

海底地盤を対象としたサンプリング・サウンディング兼用の地盤調査方法の適用性の実験的検討

著者	林 史泰
学位名	修士(工学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2019
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001882/

修士学位論文

海底地盤を対象とした
サンプリング・サウンディング兼用の地盤調査方法の
適用性の実験的検討

2019 年度

(2020 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋資源環境学専攻

林 史泰

目次

第1章 はじめに	4
1.1 既存の地盤調査方法の課題	4
1.2 提案する地盤調査方法	4
1.2.1 サンプリング兼コーン貫入試験	4
1.2.2 サンプリング兼引上げ試験	4
1.3 検討の方法	4
第2章 S&CPT の模型機を用いた貫入実験	7
2.1 検討項目	7
2.2 実験方法	7
2.3 実験結果と考察	8
第3章 S&CPT の原型機及びスリット付きパイプを用いた模型地盤への貫入実験	12
3.1 検討項目	12
3.2 実験方法	12
3.3 実験結果	16
3.4 考察	17
第4章 S&CPT・S&PUT の原型機を用いた実地盤への貫入・引上げ実験	45
4.1 検討項目	45
4.2 実験方法	45
4.3 実験結果	49
4.4 考察	53
第5章 まとめ	100
5.1 結論	100
5.2 残された課題	100
参考文献	101
付録	102

第1章 はじめに

1.1 既存の地盤調査方法の課題

着床式の洋上風力発電施設の基礎設計や、表層型メタンハイドレートや熱水鉱床などの海底下に貯蔵するエネルギー・鉱物資源の開発のためには、事前に地盤を調査し、その力学的特性や、地盤の性状や組成を把握する必要がある。

既存の地盤調査方法の評価を表-1.1 に示す。標準貫入試験（SPT : Standard Penetration Test）^{a)}は、1961 年に JIS として制定されて以降国内に広く普及し、陸域では一般的な試験である。浅水域では檣や自動昇降式作業台船（SEP : Self-Elevating Platform）^{b)}等を用いて実施が可能となる。ただし、1 m 毎にサンプラーの回収と、打撃部を水上に保持することが必要となり、施工性が悪い。

コーン貫入試験（CPT : Cone Penetration Test）^{c)}は欧州で一般的なサウンディング試験で、SPT よりも簡便であるため施工性が良い。しかし、貫入性能が低く、軟弱な地盤にしか適用できないことと、試料採取ができないことが欠点である。海底着座式の掘削装置^{d)}を用いれば、数千 m の水深にも適用できるが、コストが大きい。

したがって、水中でも貫入性能を高く維持でき、海域での施工性に優れたサンプリング・サウンディング兼用の地盤調査方法が求められている。

1.2 提案する地盤調査方法

1.2.1 サンプリング兼コーン貫入試験

サンプリング兼コーン貫入試験（S&CPT : Sampling & Cone Penetration Test）はプローブで貫入抵抗などを計測しながら、シュアの開口部よりサンプリングチューブ内に乱された試料を採取する試験である。試験の概要を図-1.1 に示す。特徴は、振動や打撃などの動的貫入により硬質な地盤に適用できることと、サンプリングを連続的に実施できること、サウンディングとサンプリングを同時に実施するため簡便で施工性が良いことである。

1.2.2 サンプリング兼引上げ試験

サンプリング兼引上げ試験（S&PUT : Sampling & Pull-up Test）はロッドに接続されたプローブを地盤中に貫入後、ロッドをガイドとしてケーシングを打設することで試料を採取し、さらに静的に引抜く際にサウンディングを行う試験である。試験の手順を図-1.2 に示す。プローブに収納された一対の抵抗翼をケーシングの打設ないしロッドの引抜きによって水平面に平行するよう展開させ、引抜き時に抵抗翼が受ける荷重を測定する。

1.3 検討の方法

最初に、S&CPT について貫入および試料採取の基本性能を模型機を用いて実験的に検討した。次に、S&CPT の原型機を用いて模型地盤に貫入する実験を行い、基本性能に加えてサウンディング性能について検討した。最後に、S&CPT と S&PUT を実地盤において適用して、サウンディング性能、貫入性能、試料採取性能、施工性、安全性について検討した。

表-1.1. 既存の地盤調査方法の評価

試験名称 評価項目	標準貫入試験	コーン貫入試験
陸域での工期(日)	△(2~6)	○(0.5)
貫入性	○(土質地盤～軟岩)	△(軟弱地盤)
調査可能な水深(m)	≦約 60 (SEP 設置時含む)	≦約 50 (海底着座式を除く)
調査深さ(m)	≦数十	≦30
試料採取	シューに採取可能	不可
海上での施工性	× (サンプラーの回収)	○ (簡便な操作)

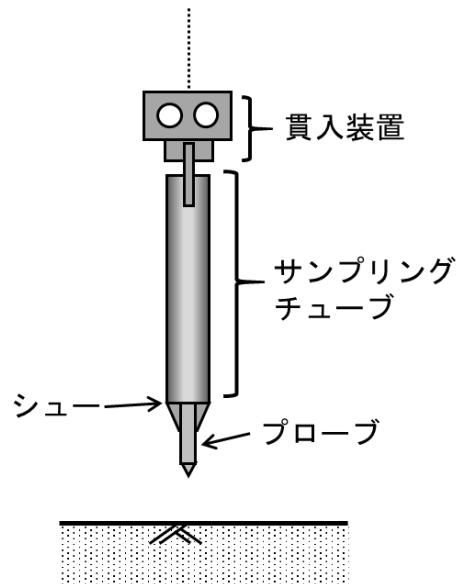


図-1.1 S&CPT の概要

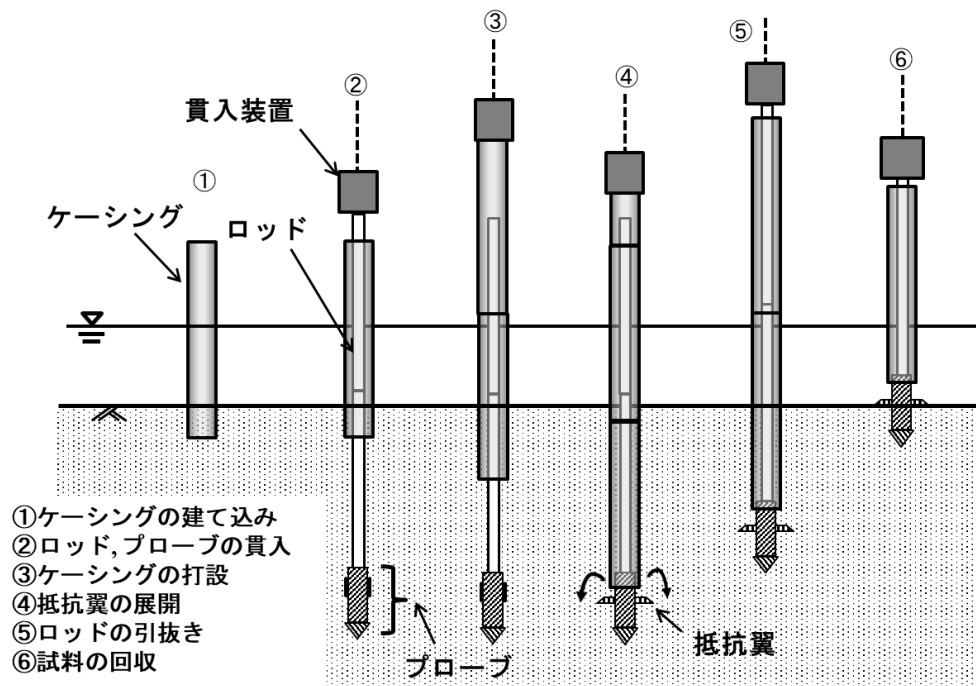


図-1.2 S&PUT の手順

第2章 S&CPT の模型機を用いた貫入実験

2.1 検討項目

試験装置の模型機を用いた貫入実験では、貫入性と試料採取性を検討した。

2.2 実験方法

2.2.1 実験装置

実験装置の概要を図-2.1 に示す。実験装置は土槽、砂、貫入体（サンプラーとシュール付プローブ）、バイブレータ（エクセン(株)、EKCA、質量 4.7 kg、周波数 160~200 Hz）⁹⁾より構成される。

土槽には外径 650~820 mm、高さ 850 mm のポリエチレン製樽形容器を用いた。地盤材料には、市販の 7 号珪砂を用いた。50%粒径 D_{50} は 0.16 mm である。水中に乾燥砂を土槽に投入して土槽の側面を軽打して、高さ 570 mm のやや密な砂地盤を作製した。湿潤単位体積重量 $\gamma_t=19.3\sim20.5\text{kN/m}^3$ である。

サンプラーには、内径 $d_{s,in}$ 52 mm、外径 $d_{s,out}$ 60 mm、長さ 1000 mm のポリ塩化ビニル製パイプを用いた。シュール付プローブには、表-2.1 と図-2.1 に示す Mk2 及び Mk3 の 2 種類を用いた。(2.1) 式に示すサンプリング断面比 R_s はサンプラーの内空断面積に対するシュール開口部の断面積 A_{in} の比のことである。

$$R_s = \frac{A_{in}}{\frac{\pi}{4} d_{s,in}^2} = \frac{\frac{\pi}{4} (d_{s,in}^2 - d_{p,1}^2) - A_{sp}}{\frac{\pi}{4} d_{s,in}^2} \quad (2.1)$$

A_{sp} はプローブとシュールを連結する十文字型の支持板（厚さ 4 mm）の断面積である。コーンの先端角は 90° とした。シュール付きプローブはポリ乳酸樹脂製で、フュージョンテクノロジー(株)製の 3D プリント L-DEVO M2030TP ⁹⁾を用いて作成した。シュール付プローブの寸法を図-2.2 に示す。

2.2.2 手順

バイブレータを用いて砂地盤に貫入体を貫入させ、貫入後はサンプラー上端をマスキングテープで塞いで気密に保ち、貫入体を鉛直上方に引き上げ、試料を採取する。以下に示す貫入実験と試料採取実験の 2 種類を実施した。

①貫入実験

振動と押し込み荷重の付加が貫入性に与える影響を調べるため貫入実験を行なった。貫入体としてプローブ無し（サンプラーのみ）とプローブ有り（Mk2 と Mk3）の 3 ケースを検討した。貫入方法を 3 ステップに分けて砂地盤に貫入させた。Step1 では貫入体とバイブレータの自重（合計約 0.048 kN）のみを加え、Step2 ではバイブレータを作動させて振動を付加した。Step3 では、さらに体重による押し込み荷重も付加した。各 Step では貫入が進まなくなった段階で貫入深さ z を測定した。図-2.3 に示すように、貫入深さ z はシュール下端から砂地盤の表面までの長さとして定義した。プローブ有りのケースでは、砂地盤表面からサンプラー頂部までの長さを鋼尺で測定し、その長さをシュール下端からサンプラー頂部までの長さ 1050 mm (Mk2)、1065 mm (Mk3) から差し引いた値を貫入深さ z とした。一方、プローブ無しのケースでは、 z はサンプラー下端から砂地盤表面までの長さとした。

②試料採取実験

貫入時の試料採取性を調べるために試料採取実験を行なった。プローブは Mk2 と Mk3 の 2 つのケースを検討した。実験では貫入実験の Step3 と同様、振動と押し込み荷重を付加して貫入体を地盤に貫入させ、貫入深さ 100 mm ごとに貫入を止め、サンプラー内の試料高さ h_s を計測した。試料高さ h_s をシュー下端から試料表面までの試料の厚さと定義した（図-2.3 参照）。最大貫入深さは Mk2 に対しては 400 mm、Mk3 に対しては 200 mm とした。

さらに、貫入体の貫入直後と回収後の試料採取性を比較するため回収後の試料高さを計測した。貫入直後の試料高さと回収後試料高さをそれぞれ $h_{s,p}$ 、 $h_{s,r}$ とし、貫入直後と回収後の試料採取率 $R_{h,p}$ と $R_{h,r}$ をを（2.1）式で求めた。

2.3 実験結果と考察

2.3.1 貫入実験

貫入実験により得られた各 Step における貫入深さ z を図-2.4 に示す。Step1 では $z < 50$ mm だが、Step2, Step3 では z が顕著に増加し、Step2 において、特にプローブ無しの場合には z の増加は著しい。したがって、振動によって貫入性能を向上させることが可能である。Step3 においてプローブ無しの場合、貫入体は全て土槽の底面まで貫入した。

Mk2 ($R_s=0.78$) の貫入深さは、Mk3 ($R_s=0.56$) の貫入深さよりも大きく、サンプリング断面比 R_s を大きくすることで貫入性能を上げることができる。また、Mk2, Mk3 の場合には、貫入体を土槽の底面まで貫入させることができる場合とそうでない場合に分かれた。

2.3.2 試料採取実験

試料採取実験により得られた貫入深さ z と試料高さ h_s の関係を図-2.5 に示す。この図をみると、Mk2 と Mk3 どちらのケースにおいても、貫入深さ z と試料高さ h_s はほぼ比例関係にある。これより、本実験の範囲では、プローブを先端に有していてもサンプラーが閉塞することなく、ほぼ一定の割合で試料がサンプラー内に入っていると考えられた。

図-2.6 に貫入直後の採取率 $R_{h,p}$ と回収後 $R_{h,r}$ の採取率の変化を示す。ほぼすべてのケースにおいて、 $R_{h,p}$ と $R_{h,r}$ の差は 5% 未満であることがわかる。1 ケースだけ、回収時にサンプラー上端の密封が不十分であったため、試料の落下が生じており、密封することにより採取に伴う試料の落下を低減できる。 $R_{h,p}$ は、Mk2 の値が Mk3 を全て上回っており、サンプリング断面比 R_s を大きくすることで採取率を向上させることができる。

図-2.7 にサンプリング断面比 R_s と貫入直後の採取率 $R_{h,p}$ の関係を示す。Mk2 ($R_s=0.71$) では、 $R_{h,p}$ は最大 78% となり、Mk3 ($R_s=0.53$) では最大 67% となり、 R_s と $R_{h,p}$ は比例関係にあるわけではないことがわかる。

表-2.1 実験装置の概要

モデル	Mk2	Mk3
概観		
$l_{p,1}(\text{mm})$	110	114
$l_{p,2}(\text{mm})$	70	86
$d_{p,1}(\text{mm})$	22	33
$d_{p,2}(\text{mm})$	65	65
$A_{sp}(\text{mm}^2)$	240	152
R_s	0.71	0.53

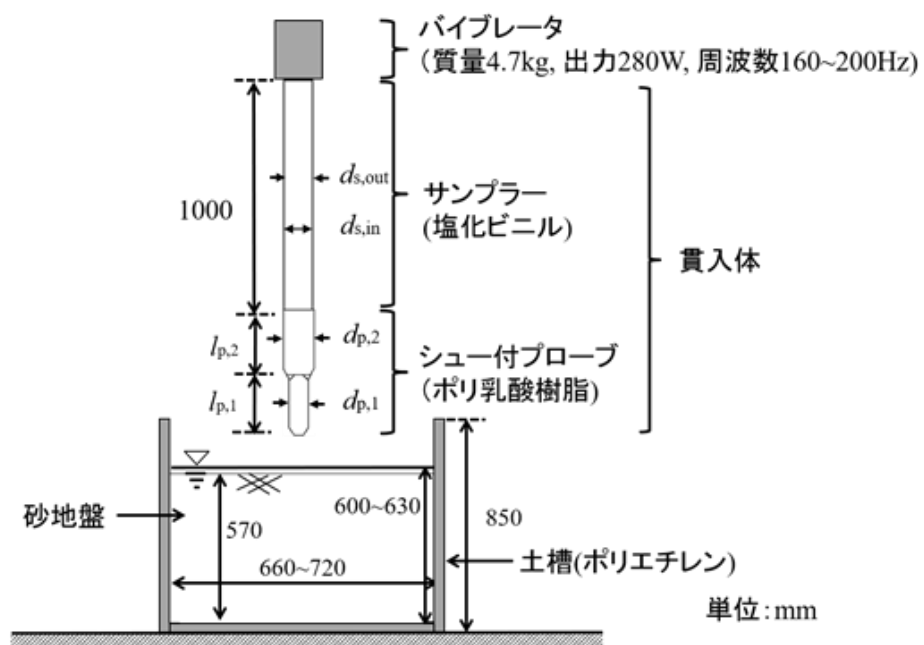


図-2.1 実験装置の概要

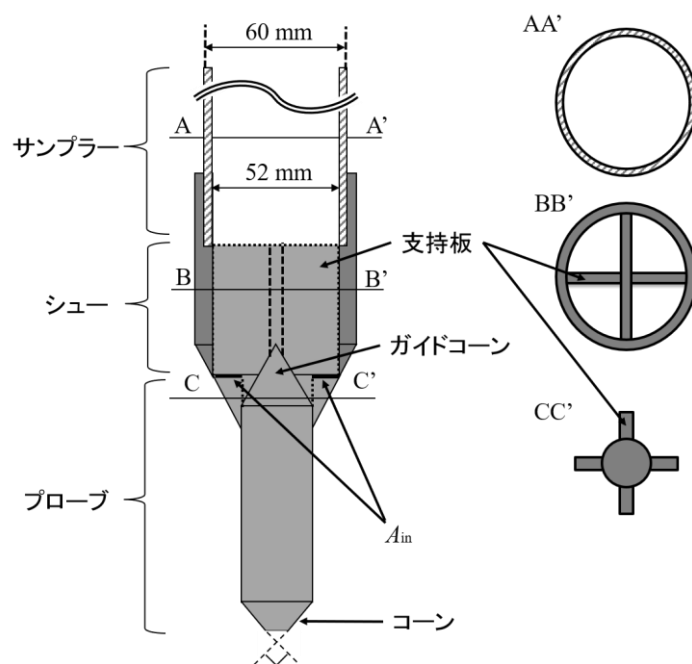


図-2.2 シュー付きプローブの形状

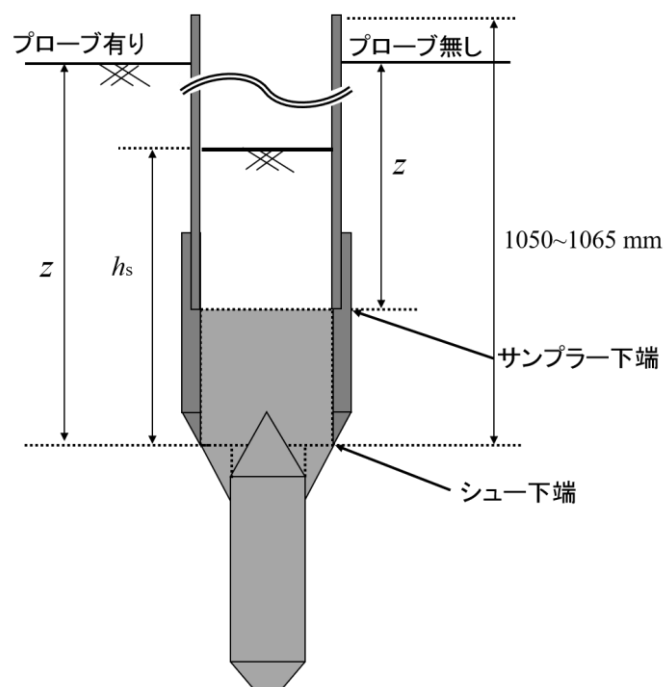


図-2.3 貫入深さ z , 試料採取高さ h_s の定義

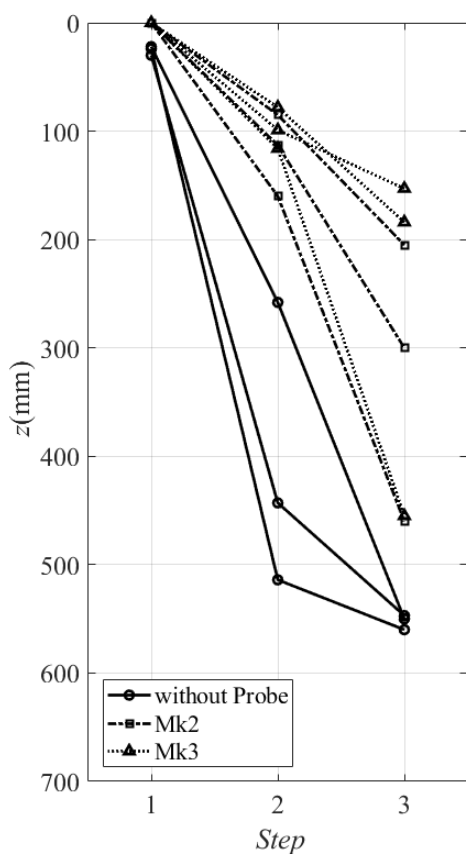


図-2.4 各ステップの貫入深さ z

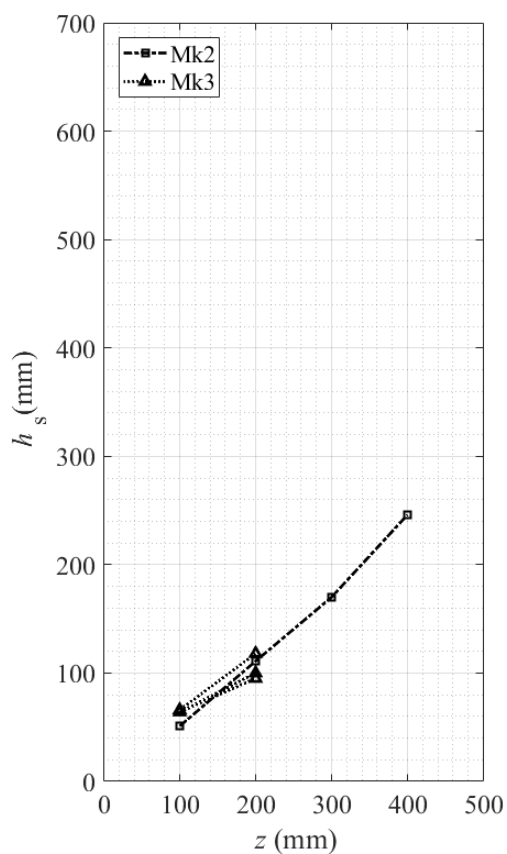


図-2.5 貫入深さ z と試料採取高さ h_s の関係

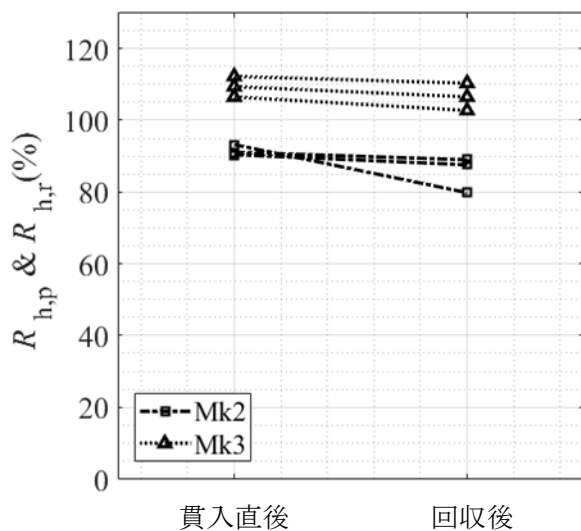


図-2.6 貫入直後と回収後の R_h の関係

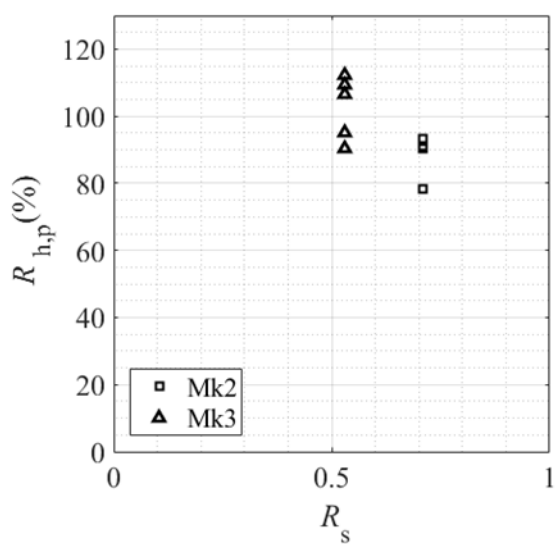


図-2.7 R_s と $R_{h,p}$ の関係

第3章 S&CPT の原型機及びスリット付きパイプを用いた模型地盤への貫入実験

3.1 検討項目

3.1.1 S&CPT の原型機を用いた模型地盤への貫入実験

土槽内に作製した模型地盤に対して、S&CPT の原型機を適用して試験の実施可能性に係る検討を行い、実地盤に適用する場合に想定される課題を抽出する。実験の概要を図-3.1 に示す。貫入性能、サウンディング性能、試料採取性能を検討した。

①貫入性

プローブの貫入深さ z_p と吊荷重 T の関係を求め、飽和度やシュウの構造、スリーブの取り付け位置が貫入性に及ぼす影響を検討する。

②試料採取性

サンプリングチューブの最大貫入深さ $z_{c,max}$ と試料採取率 R_h の関係から、飽和度やシュウの構造、スリーブの取り付け位置が試料採取性に及ぼす影響を検討する。試料採取率 R_h は、図 3.18 に示すように、

(3.1) 式に示すようにシュウの開口部を理想的に通過する試料の体積 V_{in} に対する実際に採取された試料の体積 V_s の百分率で表す。

$$R_h = \frac{V_s}{V_{in}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

$$V_s = \frac{mg}{\gamma_t} \quad (3.2)$$

$$V_{in} = \frac{\pi}{4} (d_{s,in,2}^2 - d_p^2) \cdot z_{c,max} \quad (3.3)$$

③サウンディング性能

コーン貫入抵抗 Q_c 及び吊荷重 T とプローブの貫入深さ z_p の関係を求め、振動時の荷重計測から地盤特性を推定する方法を検討する。

3.1.2 スリット付きパイプを用いた模型地盤への貫入実験

試料の管内閉塞を防止することで貫入性能及び試料採取性能を向上させるため、パイプの側面にスリットを設け、図-3.2 に示すように、模型地盤にスリット付きパイプを貫入させる実験を行い、以下を検討した。

①貫入性

パイプの貫入深さ z とスリットの開口比 k の関係を求め、開口比が貫入性に及ぼす影響を検討する。

②試料採取性

パイプの貫入深さ z と試料採取率 R_h の関係から、開口比 k が試料採取性に及ぼす影響を検討する。

3.2 実験方法

3.2.1 試験装置

①S&CPT の原型機の貫入実験

S&CPT の原型機、その構成と寸法をそれぞれ図-3.3、図-3.4 に示す。プローブ（先端コーン、計

測部など), シュー (支持板, ガイドコーンなど), サンプラー (スリーブ, スリーブケース, サンプリングチューブ), 逆止弁付き接続管, チャッキングプレートで構成される。

プローブの構成を図-3.5 に示す。プローブの先端コーンは径 48.8 mm, 先端角 90°の鋼材である。計測部は外径 49 mm の円筒状の鋼材で, 圧力計 (容量 50 MPa, 断面積 $A_p=156.1 \text{ mm}^2$) と加速度計 (容量 $\pm 19.6 \text{ m/s}^2$) を制御する自記式の電子基板を内蔵している。

シューは外径 114 mm, 内径 100 mm の鋼材で, 内側の十文字の支持板でプローブを固定している。ガイドコーンは採取した試料がせん断によって膨張し閉塞すること防ぐことを目的としている。スリーブはシュー開口部より入ってくる乱された試料を収納するために用いる。スリーブケースは高さ 115 mm, 内径 92 mm の円筒状の鋼材であり, スリーブをサンプラーに固定するために用いる。サンプリングチューブは外径 114 mm, 内径 100 mm, 長さ 1000 mm/本の鋼管である。

逆止弁付き接続管はサンプラーの揚収時に, 試料の落下を防止するためのものである。

チャッキングプレートはチャックが把持するための鋼板で, 幅 214 mm, 長さ 230 mm である。

②スリット付きパイプの貫入実験

スリット付きパイプとスリーブケースの寸法を図-3.6 に示す。スリット付きパイプは, 内径 52 mm, 外径 60 mm, 長さ 1000 mm のポリ塩化ビニル製のパイプである。図-3.7 にスリット付きパイプの正面図, 展開図を示す。

図-3.8 に示すように, スリットの配置は三方向型と軸対称型の 2 種類, スリットの単位幅 $s=15, 20, 25 \text{ mm}$ の 3 種類とした。スリットの開口比 k を管の円周長に対する開口部の円弧長さ $l=3s$ の比 (図-3.9 参照) として定義し, (3.4) 式で定義する。 r は管の外半径である。

$$k = \frac{l}{2\pi r} \quad (3.4)$$

スリーブとスリーブケースを図-3.10 に示す。スリーブケースは高さ 108 mm, 内径 46 mm の円筒状の鋼材であり, スリーブをパイプに固定するために用いる。

3.2.2 貫入装置

①S&CPT の原型機の貫入実験

図-3.11 に示すバイブロハンマ (調和工業(株), ハンディーバイブロ HDV-25E, 振動数 46.7 Hz, 最大起振力 3.43kN, 振幅 1.3 mm) を用いた。諸元を表-3.1 に示す。本体 (質量約 30 kg), フレキシブルシャフト (長さ 5 m), パワーユニット (質量約 100 kg, 必要皮相電力 20kVA) より構成される。本体は偏心重錘 (偏心モーメント 0.04 kg・m) とチャックなどで構成され, パワーユニットはモーターとチャックの油圧の制御を行ない, モーターの回転がフレキシブルシャフトを介して伝わり, 偏心重錘に伝えられる。

②スリット付きパイプの貫入実験

壁打用バイブレータ (エクセン(株), 軽便壁打 EKCA, 160~200 Hz) ⁶⁾ を用いた。キャップ (木製) をバイブレータとスリット付きパイプとのアタッチメントとして使用した。

3.2.3 計測システム

①S&CPT の原型機の貫入実験

計測システムは表-3.2 に示す計測機器とデータロガー ((株)共和電業, ユニバーサルレコーダ, EDX-200A), PC で構成される. 構成を図-3.12 に示す.

計測項目は, データロガーで計測する地上計測データとプローブの電子基板で計測する孔内計測データに分けられる.

地上計測データは鉛直変位 d と吊荷重 T , 加速度 $a_{v,x}, a_{v,y}, a_{v,z}$ である. 鉛直変位はワイヤ式変位計, 吊荷重は引張荷重計, 加速度は加速度計で計測を行った. 測定の開始・終了はデータロガー用の PC ソフトウェア ((株)共和電業, DCS-100A) で行う. ワイヤ式変位計のワイヤ先端をバイプロハンマ本体のハンドルに結び, 加速度計 ((株)共和電業, ASW-20A, $\pm 196.1 \text{ m/s}^2$) は図-3.13 のようにチャッキングプレートにポリアミド系接着剤を用いて固定した.

孔内計測データは, コーン貫入抵抗 Q_c と三軸加速度 $a_{p,x}, a_{p,y}, a_{p,z}$ ($a_{p,z}$ が下向き正) であり, 電子基板に挿入した microSD に時刻系列データとして収録される. 測定の開始・終了・データの抽出は PC 用のソフトウェア Pilot1.4 ((有)アイオーテック) で行う. Q_c は測定される圧力 q_p を校正し (3.5) 式を用いて荷重に換算している. q_p は圧力計の出力値 (MPa), $q_{p,0}$ は圧力計の測定開始時の値である. k_c は校正係数であり, 値は $0.61978 \text{ (m}^2\text{)}$ である.

$$Q_c = k_c(q_p - q_{p,0}) \quad (3.5)$$

3.2.4 模型地盤

地盤材料には表-3.3 に示す物性値をもつ市販の山形 6 号珪砂を用いた. 土粒子の密度 2.61 Mg/m^3 , 50% 粒径 $D_{50}=0.30 \text{ mm}$, 均等係数 $U_c=2.42$, 最小乾燥密度 $\rho_{dmin}=1.392 \text{ Mg/m}^3$, 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.681 \text{ Mg/m}^3$ である. 粒径加積曲線を図-3.14 に示す. 高さ 850 mm , 内径 $660\sim 720 \text{ mm}$ のポリエチレン製樽型土槽に乾燥した山形 6 号珪砂を投入して, 高さ 690 mm , 目標相対密度 $D_r=90\%$ の砂地盤を作製した. 山形 6 号珪砂の物性値を表-3.3 に示す. 各ケースを実施する前に棒状のバイブレータ (エクセン(株), E28DA) で 3 分間の締固めを行った.

3.2.5 実験の手順

① S&CPT の原型機の貫入実験

模型実験の手順を図-3.15 に示す. 詳細な作業手順は以下の通りである.

- 原型機の組立を行なう. 実験装置を図-3.16 のように配置し, 角材 (端太角) の上で, シュー, サンプリングチューブ, 接続管, チャッキングプレートを繋ぐ.
- プローブ内の電子基板の制御ソフト (Pilot1.4) を PC 上で起動し, サンプリング周波数 (100 Hz) や測定時間 (5 分間), 測定間隔 (0.01 s) を設定し, 孔内計測を開始する. 計測中を意味するランプの点滅を確認し, フタで計測部を密閉する.
- 組み立てた原型機のシューにプローブを固定し, チェーンブロックのフックにかけたスリングをチャッキングプレートにシャックルで結ぶ. チェーンブロックを操作して原型機を土槽に建て込む. バイプロハンマ本体をスリングのチョーク吊りによって懸垂し, チャックを操作してチャッキングプレートを把持する. 各計測機器とロガーをケーブルで接続する.
- PC でロガーの制御ソフト (DCX-100A) を起動して, サンプリング周波数を 100 Hz とする. ロガーのモニタ測定で, 出力されたデータを初期値として記録する. 原型機を懸垂した状態で零点を合わせた後に, ロガーのデータ集録 (地上計測) を開始する.

- e) バイブロハンマのパワーユニットを操作して振動を ON にする。
- f) チェーンブロックを操作して原型機の貫入を開始する。サンプリングチューブが 1 m 貫入し、目標深度に到達したら、貫入を終了する。また、サンプリングチューブの貫入が困難になった場合、貫入を中止する。
- g) バイブロハンマの振動を OFF にする。
- h) チェーンブロックを操作して原型機を引抜く。この時、シューから試料が落下しないように、ウェスでシュー近傍を被覆する。
- i) 原型機を引抜き後、チャッキングプレートにシャックルでスリングを再度繋ぎ、フックにかける。土槽の上でチャックを操作して把持を解き、バイブロハンマ本体をフックから外す。チェーンブロックを操作して原型機を降下させ、角材（端太）の上に横たえ、原型機を分解する。シューの内部に入っている試料はバットに入れる。シューをサンプリングチューブから外し、スリーブごと試料を取り出す。
- j) ロガーのデータ集録（地上計測）を終了する。プローブをシューから取り外し、電子基板を PC に接続して孔内計測を終了する。
- k) 試料をバットに入れ、質量 m を計測する。

②スリット付きパイプの貫入実験

- a) 自重による貫入を行う（Step1）。スリット付きパイプを模型地盤表面に静置し、キャップとバイブレータを載せた後、鋼尺で貫入深さ z_1 と試料の高さ $h_{s,p1}$ を計測する。図-3.17 に貫入深さ z と試料高さ $h_{s,p}$ の定義を示す。
- b) 振動を付加する（Step2）。壁打ち用バイブレータの振動をオンにして、スリット付きパイプを貫入させる。貫入速度が 2 mm/s 以下となった時点で振動を停止し、鋼尺で貫入深さ z_2 と試料の高さ $h_{s,p2}$ を計測する。
- c) 振動に加え、約 200N の荷重を付加する（Step3）。壁打ち用バイブレータの振動をオンにして、体重をかけて押し込む。貫入速度が 2 mm/s 以下となった時点で振動を停止し、鋼尺で貫入深さ z_3 と試料の高さ $h_{s,p3}$ を計測する。

3.2.6 ケース

①S&CPT の原型機の貫入実験

検討するケースを表-3.4 に示す。また、サンプリングチューブの貫入深度 z_c 、実際の採取された試料の体積 V_s 、理想的に採取される試料の体積 V_{in} の定義を図-3.18 に示す。貫入速度は 10 mm/s 程度、プローブの最大予定貫入深さ $z_{p,max}$ は 690 mm とした。飽和度の影響を検討するために、まず地盤条件を湿潤砂・飽和砂の 2 つとした。湿潤砂は、実験環境が野外であったため、飽和度及び相対密度、地下水位は不明である。次にシューの形状が貫入性能と試料採取性能を検討するため、シューのタイプを Mark1 と Mark2 の 2 つとした。スリーブの取り付け位置は外側を基本ケースとしたが、スリーブが押し広げられないことが管内閉塞を促進していると予想して、スリーブの取付け位置を変えることで貫入性と試料採取性の向上を見込んで、内側につけた場合を S&CPT-4 で検討した。

②スリット付きパイプの貫入実験

検討するケースを表-3.5 に示す．スリットの配置，スリーブの有無，開口比が貫入深さ z 及び試料高さ $h_{s,p}$ に及ぼす影響を検討した．

3.3 実験結果

3.3.1 S&CPT の原型機の貫入実験

実験結果の一覧を表-3.6 に示す．

①S&CPT-1

計測データの時系列分布を図-3.19 に示す．11:57:30 にバイブロハンマの振動開始に伴う $a_{v,z}$ や T の周期的な挙動，11:58:25 にバイブロハンマの振動停止に伴う $a_{p,z}$ と $a_{v,z}$ の収束，11:57:50 に先端コーンの接地に伴う T の減少と q_p の増加などを確認した．

深度分布を図-3.20 に示す．引抜き開始直後には最大で約 1.5 kN に達し，その後は一定して 0.9kN 程度であった． Q_c は 150 mm まで増加し最大で約 0.5 kN になった後に減少し，貫入深さ 200 mm でゼロになった．引抜き時も荷重はゼロとなった．貫入深さが 300 mm に達した辺りから原型機が傾き始め，チェーンブロックを操作しても貫入が進まなくなったため，貫入不可とした． T は懸垂時に約 0.84 kN であり，貫入するにつれて減少し，200 mm 程度貫入後にゼロとなった．加速度のうち $a_{v,x}$ や $a_{v,y}$ は，貫入と共に増加していき，貫入深さ 320 mm で最大となり 70 m/s² 程度であった． $a_{v,z}$ は深度が大きくなるにつれて増加し最大で約 100 m/s² となった．最大貫入深さは約 320 mm であった．

図-3.21 に示すように，揚収後はシューに試料が入っていることを確認した．採取した試料の質量 m は 1.094 kg であった．含水比 $w=0.7\%$ であった．

②S&CPT-2

計測データの時系列分布と図-3.22 に示す．各作業の時刻とそれに伴うデータの変動を確認した．14:54:00 から 14:54:10 にかけてなどを確認した． $a_{p,z}$ と T の挙動はバイブロハンマのスイッチを一時的にオンにしたことによるものである．

深度分布を図-3.23 に示す． T は懸垂時に約 0.84 kN であり，貫入するにつれて減少し，300 mm 程度貫入後にゼロとなった．引抜き開始直後には最大で約 2 kN となり，その後は一定して 0.9 kN 程度であった．一方 Q_c は貫入前から引抜き終了まではほぼゼロのままであった．加速度については， $a_{p,x}$ ， $a_{v,x}$ はどの深度でも 20 m/s² 以下で， $a_{v,y}$ は貫入と共に増加していき，深度 450 mm で 50 m/s² となった． $a_{v,z}$ は深度が大きくなるにつれて増加し最大で約 100 m/s² となった．最大貫入深さは 500 mm 程度であった．

揚収後，試料が図-3.24 のようにスリーブ内に入っており，シュー下端からスリーブケース上端までの間で試料が閉塞していた．収納されたスリーブは押し広げられていなかった．採取した試料の質量 m は 1.643 kg，含水比は $w=23.6\%$ であった．

③S&CPT-3

計測データの時系列分布と図-3.25 に示す．14:10:45 にバイブロハンマの振動開始に伴う $a_{v,z}$ と

$a_{p,z}$, T の周期的な挙動や 14:12:20 にバイブロハンマの振動停止に伴う $a_{p,z}$ と $a_{v,z}$ の収束などを確認した。

深度分布を図-3.26 に示す。 T は懸垂時に約 0.84 kN であり、300 mm 以深から減少し、400 mm 貫入後にゼロとなった。また Q_c は貫入時にゼロのままであり、引抜き時はマイナスの値を示した。最大貫入深さは 600 mm となった。加速度については、 $a_{p,x}$, $a_{v,x}$ はどの深度でも 20 m/s² 以下で、 $a_{v,y}$ と $a_{v,z}$ は貫入と共に増加していき、最大でそれぞれ約 40 m/s², 約 100 m/s² となった。採取した試料の質量 m は 2.215 kg で、含水比は $w=52.6\%$ であった。

S&CPT-2 と同様、シュー下端からスリーブケース上端までの間で試料が閉塞していた。収納されたスリーブは押し広げられていなかった。

④S&CPT-4

計測データの時系列分布と図-3.27 に示す。17:06:20 にバイブロハンマの振動開始に伴う $a_{v,z}$ と $a_{p,z}$, T の周期的な挙動、17:07:24 にバイブロハンマの振動停止に伴う $a_{p,z}$ と $a_{v,z}$ の収束などを確認した。

深度分布を図-3.28 に示す。 T は懸垂時に約 0.85 kN であり、300 mm 以深から減少し、500 mm 貫入後にゼロとなった。また Q_c は貫入時からゼロのままであり、引抜き時はマイナスの値を示した。最大貫入深さは 600 mm となった。加速度については、 $a_{p,x}$, $a_{v,x}$ はどの深度でも 20 m/s² 以下で、 $a_{v,y}$ と $a_{v,z}$ は貫入と共に増加していき、最大でそれぞれ約 20 m/s², 約 100 m/s² となった。

揚収後の試料の質量 m は、1.345 kg で、含水比は $w=107.8\%$ であった。

3.3.2 スリット付きパイプの貫入実験

図-3.29 に各ステップの貫入深さを示す。Step1 ではいずれのケースでも貫入深さが 100 mm 以下となった。スリット無し ($k=0.00$) は、スリット有りの全てのケースよりも Step2 と Step3 の貫入深さが大きく、Step2 では 400 mm 以上、Step3 では 600 mm 以上貫入した。また、スリーブ無しのケースがスリーブ有りのケースよりも貫入深さが大きくなる傾向が見られた。Step3 ではスリーブ無しのケースと無しのケースの貫入深さの差が顕著になった。

図-3.30 に各ステップの試料高さを示す。Step1 ではいずれのケースでも試料高さが 100 mm 以下となった。スリット無し ($k=0.00$) は、スリット有りの全てのケースよりも Step2 と Step3 の試料高さが大きく、Step2 では 450 mm 以上、Step3 では 750 mm 以上となった。また、Step2, 3 においてスリーブ無し (図中実線) は、スリーブ有りのケースにより試料高さが大きくなる傾向が見られた。

3.4 考察

3.4.1 S&CPT の原型機の貫入実験

①貫入性能

バイブロハンマの設計施工便覧 (バイブロハンマ工学技術研究会, 2015) ^{h)}によれば、バイブロハンマによる杭の打ち込みでは、周面摩擦力に対してバイブロハンマの起振力が、杭先端に作用する荷重に対して杭とバイブロハンマの重量の合計が上回れば打ち込みが可能とされている。ここでは、原型機を円柱状の鋼材と仮定し、原型機に作用する周面摩擦力 F_s とテルツァーギの支持力

公式 (Terzaghi, 1942) ⁱ⁾ による先端荷重 Q_b の推定を行った。なお、対象が砂地盤であるため、粘着力 c はゼロとした。(3.6) 式に推定式を示す。 φ' は砂のせん断抵抗角で、 δ は砂と鋼材の有効摩擦角で値は 10° とした。 γ' (20 kN/m^3) は単位体積重量で値は 20 kN/m^3 とした。 D は貫入深さ、 A ($=0.0102 \text{ m}^2$) は円柱の断面積、 B ($=0.114 \text{ m}$) は円柱の直径である。 N_γ 、 N_q は支持力係数、 K_p はランキンの受働土圧係数である。 s_γ 、 s_q は形状係数 ⁱ⁾ であり円形と仮定しているため奥行き $L=B$ とし、 α は 0.3 とした。図-3.31,32 に推定結果を示す。

$$F_s = (1 - \sin\varphi')\gamma'Dl \tan\delta \quad (3.6)$$

$$Q_b = \left(\frac{\gamma'B}{2}N_\gamma s_\gamma + \gamma'DN_q s_q\right)A \quad (3.7)$$

$$N_\gamma = 2(N_q + 1) \tan\varphi'$$

$$N_q = K_p \exp(\pi \tan\varphi')$$

$$s_\gamma = 1 - \alpha \frac{B}{L}$$

$$s_q = 1 + (\tan\varphi') \frac{B}{L}$$

S&CPT-1 の深度分布をみると、200 mm 貫入後から Q_c と T がほぼゼロとなっているが、これはシュー近傍の閉塞が生じ、貫入抵抗が増大したと考えた。また不飽和の湿潤砂では地盤が液状化しないため、振動によって周面摩擦力 F_s と Q_b を低減しにくいと考えられた。

S&CPT-2 は S&CPT-1 よりも 200 mm 程度 $z_{p,\max}$ が大きくなっていることから、飽和砂に関しては振動が有効であり、より高い貫入性能を発揮できることがわかった。

S&CPT-3,4 より、シュー側面にスリットを設けることで $z_{p,\max}$ は約 100 mm 増加したが、最大予定貫入深さには至らず、貫入性能は低かった。また、S&CPT-4 ではスリーブの取り付け位置を変えることにより閉塞を防止することを試みたが、 $z_{p,\max}$ はほぼ S&CPT-3 と同じであった。

②サウンディング性能

S&CPT-1 より、深さ 150 mm までは Q_c は増大したが、それ以深では減少し、200 mm 貫入した時点でゼロになったことや、S&CPT-2,3,4 では貫入時は常にゼロとなったことから、コーン近傍の地盤は液状化し、貫入抵抗がゼロになることがわかった。

③試料採取性能

S&CPT-1 で R_h が大きな値になっているのは、貫入時に原型機が大きく傾いたことで鉛直変位が過小に出力され、 $z_{c,\max}$ が実際の値よりも小さく算出されたことや、シュー下方の側壁にも試料が付着していた試料を採取したことで実際に採取される試料が増えたことが原因と考えられた。

S&CPT-2,3 では R_h が 80%以上となったが、どちらもスリーブケースないしシューで閉塞が生じており、長尺な試料の採取が困難となることがわかった。S&CPT-2 と S&CPT-3 を比較すると、シュー側面にスリットを設けることで $z_{p,\max}$ は増加するが、増加量は 100 mm 程度であった。

スリーブケースの取り付け位置を内側にすると、 R_h は 30%以上低下したことから、スリーブはむしろ、乱された試料がサンプラー内に入ってくるのを妨げるため、この取り付け位置は不適であ

るとわかった。

3.4.2. スリット付きパイプの貫入実験

①貫入性能

Step2 および Step3 における貫入深さ z_2 と z_3 と開口比 k の関係を図-3.33, 34 に示す。Step2 では、スリット有りのケースではいずれも z_2 が 150~300 mm 程度にとどまっており、開口比との相関はそれほど見られなかった。スリーブ有りの方がより z_2 が小さくなってしまっているのは、スリーブケースをつけることで試験装置の断面積が大きくなったことによる支持力の増加が考えられた。Step3 では、スリーブ無しのケースにおいて、 k が大きくなるほど z_3 が小さくなる傾向が見られた。貫入時、スリットの上面には入り込んだ砂による支持力が働き、抵抗となっていることが考えられた。三方向型と軸対称型を比較してもそれぞれの z_2 と z_3 に差はほとんどなく、内径 52mm のパイプの場合、スリットは支持力を増加させ、貫入性は低下することがわかった。

②試料採取性

Step2 および 3 における試料高さと開口比の関係を図-3.35, 36 に示す。スリット有りの場合、 $h_{s,p2}$ はどの開口比においても概ね一様で、200~300 mm 程度であった。、 $h_{s,p3}$ は開口比が大きくなるにつれて低下する傾向が見られた。三方向型と軸対称型を比較すると、 $h_{s,p3}$ では三方向型のスリーブ有りのケースにおいて特に試料高さが低い傾向が見られた。いずれにせよ、スリットによる試料採取性能の向上は見込めないと思われた。

表-3.1 バイブロハンマの諸元

項目	値
振動数	46.7(Hz)
起振力	3.43(kN)
振幅	1.1(mm)
本体質量	30(kg)

表-3.2 計測項目と計測機器

計測項目	設置場所	記号	単位	計測機器(メーカー, 機種, 容量)
鉛直変位	作業台	d	mm	ワイヤ式変位計 ((株)共和電業, DTPA-A-2K, 2000 mm)
吊荷重	貫入装置上方	T	kN	引張荷重計 ((株)共和電業, LUR-A-2kNSA1, 2kN)
加速度	チャッキングプレート	$a_{v,x}, a_{v,y}, a_{v,z}$	m/s^2	加速度計 ((株)共和電業, ASW-20A, $\pm 196.1 \text{ m/s}^2$)
三軸加速度	プローブ	$a_{p,x}, a_{p,y}, a_{p,z}$	m/s^2	加速度計 ((有)アイオーテクニック, AMI603, $\pm 19.6 \text{ m/s}^2$)
コーン貫入抵抗	プローブ	Q_c	kN	圧力計 ((有)アイオーテクニック, FP110, 50MPa, 断面積 $A_p = 156.1 \text{ mm}^2$)

表-3.3 山形 6 号珪砂の物性値

項目		値
土粒子の密度 ρ_s		2.61(Mg/m ³) ^{注1)}
50% 粒径 D_{50}		0.30(mm)
60% 粒径 D_{60}		0.34(mm)
10% 粒径 D_{10}		0.14(mm)
均等係数 U_c		2.42
乾燥密度	ρ_{dmin}	1.392(Mg/m ³)
	ρ_{dmax}	1.681(Mg/m ³)

注 1) 北日本産業(株)の珪砂データ (<http://www.catvy.ne.jp/~ktsangyo/data1.htm>)

表-3.4 ケース

Case	地盤条件	飽和度 S_r (%)	目標相対密度 D_r (%)	シュー	スリーブの取付け位置
S&CPT-1	湿潤砂	N.A.	N.A.	 Mark1	 スリーブケースの外側
S&CPT-2	飽和砂	100	90		
S&CPT-3					
S&CPT-4					

表-3.5 スリット付きパイプの貫入実験のケース

スリットの配置と幅 s (mm)	スリーブ	開口比 k
None (スリット無し)	無し	0.000
	有り	
三方向型, スリットの幅 $s=15$	無し	0.239
	有り	
軸対称型, スリットの幅 $s=15$	無し	0.239
	有り	
三方向型, スリットの幅 $s=15$	無し	0.318
	有り	
軸対称型, スリットの幅 $s=20$	無し	0.318
	有り	
三方向型, スリットの幅 $s=25$	無し	0.390
	有り	
軸対称型, スリットの幅 $s=25$	無し	0.390
	有り	

表-3.6 S&CPT の模型実験の結果の一覧

Case	プローブの 最大貫入深さ $z_{p,max}(mm)$	サンプリングチューブ の最大貫入深さ $z_{c,max}(mm)$	試料の質量 $m(kg)$	試料採取率 $R_h(\%)$
S&CPT-1	327.7	14.4	1.094	854.3
S&CPT-2	503.1	193.8	1.643	95.3
S&CPT 3	599.4	290.1	2.215	85.9
S&CPT-4	594.8	285.5	1.345	53.0

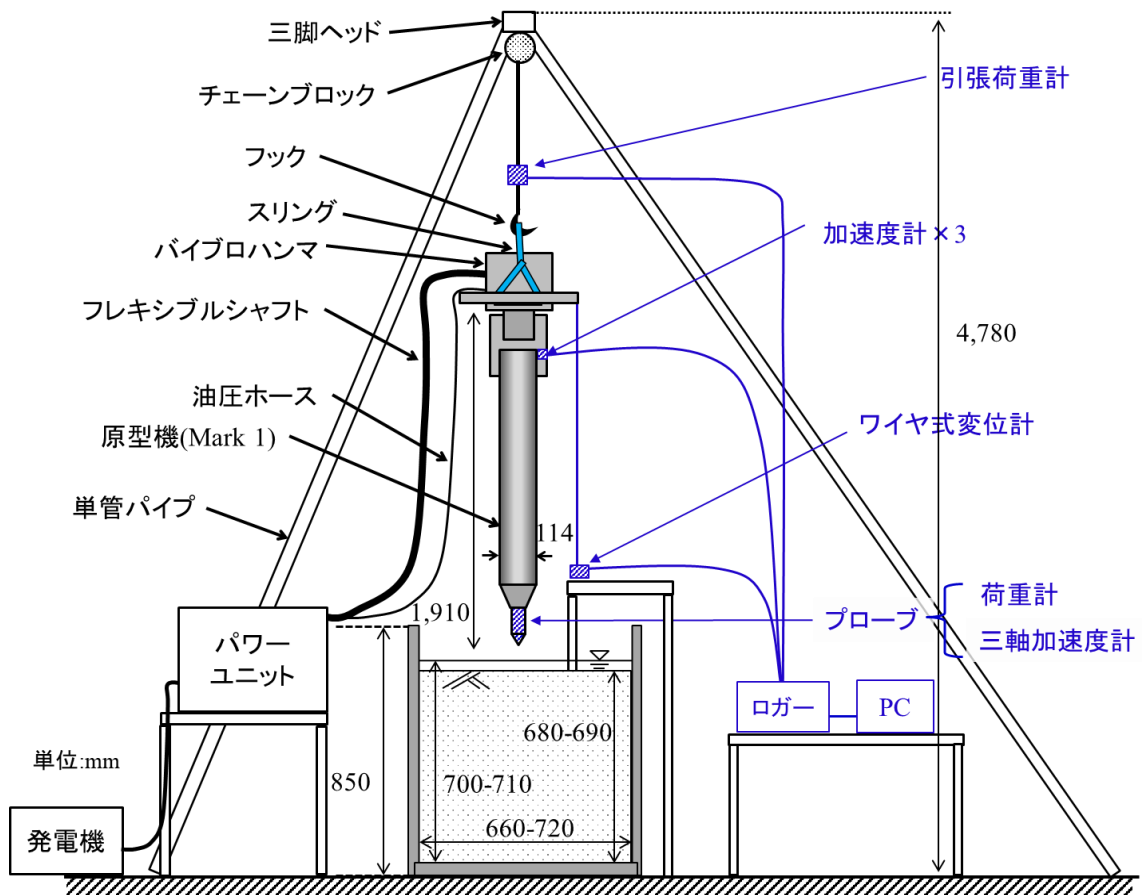


図-3.1 模型地盤への貫入実験の概要



図-3.2 スリット付きパイプの貫入実験

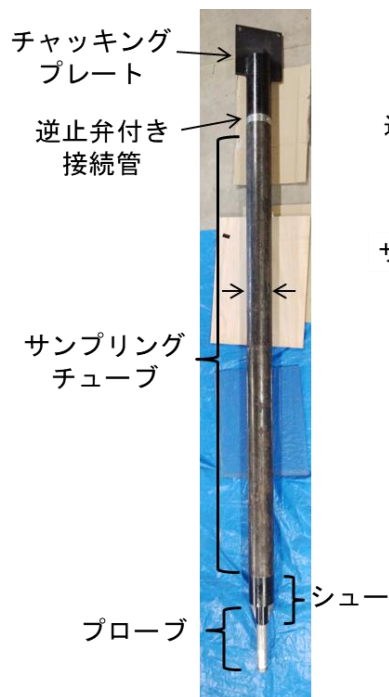


図-3.3 原型機

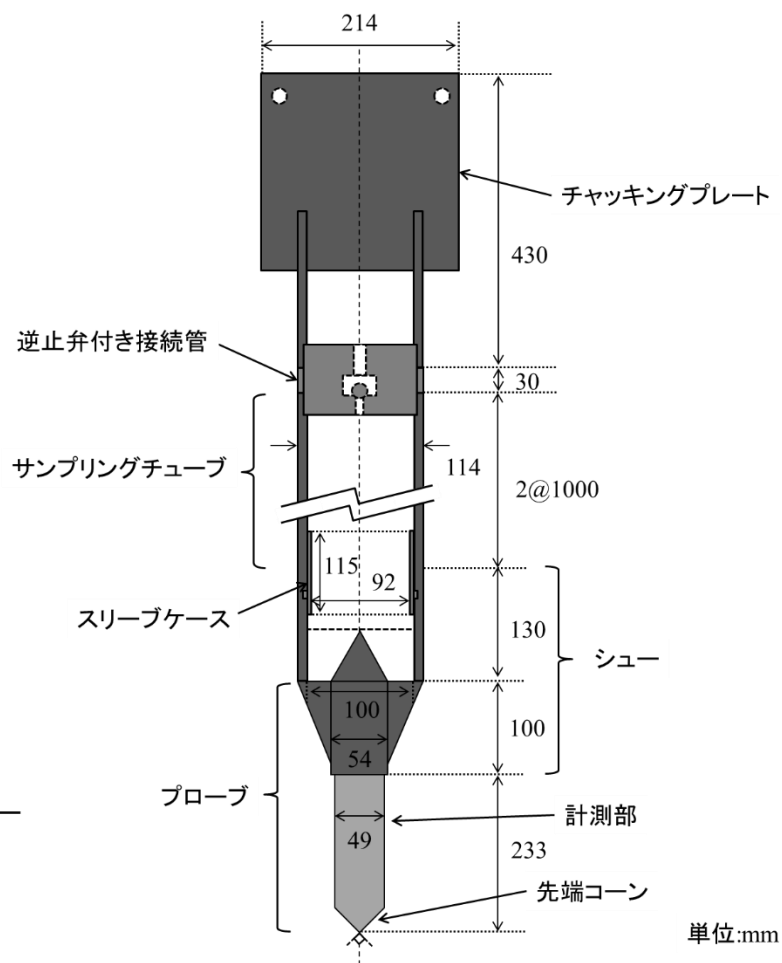


図-3.4 原型機の構成と寸法

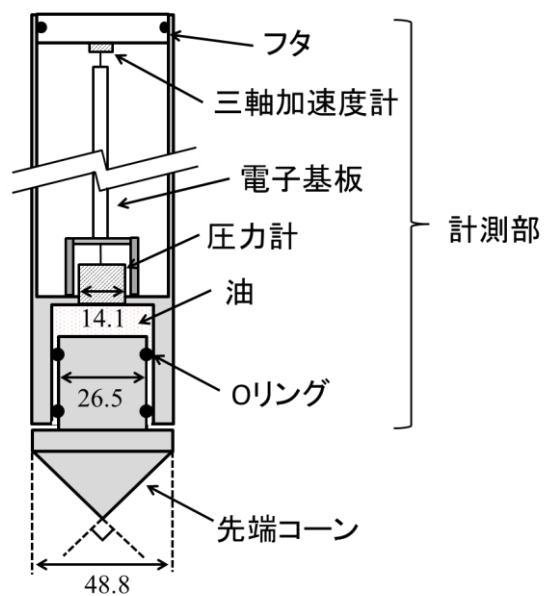


図-3.5 プローブの構成

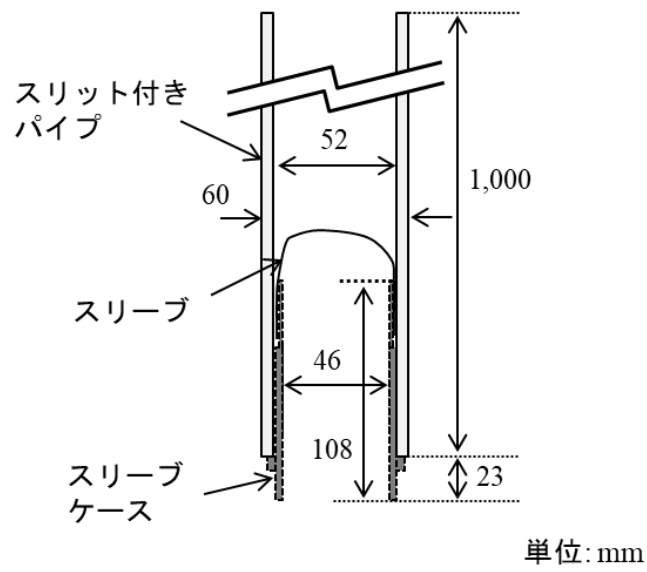


図-3.6 試験装置の寸法

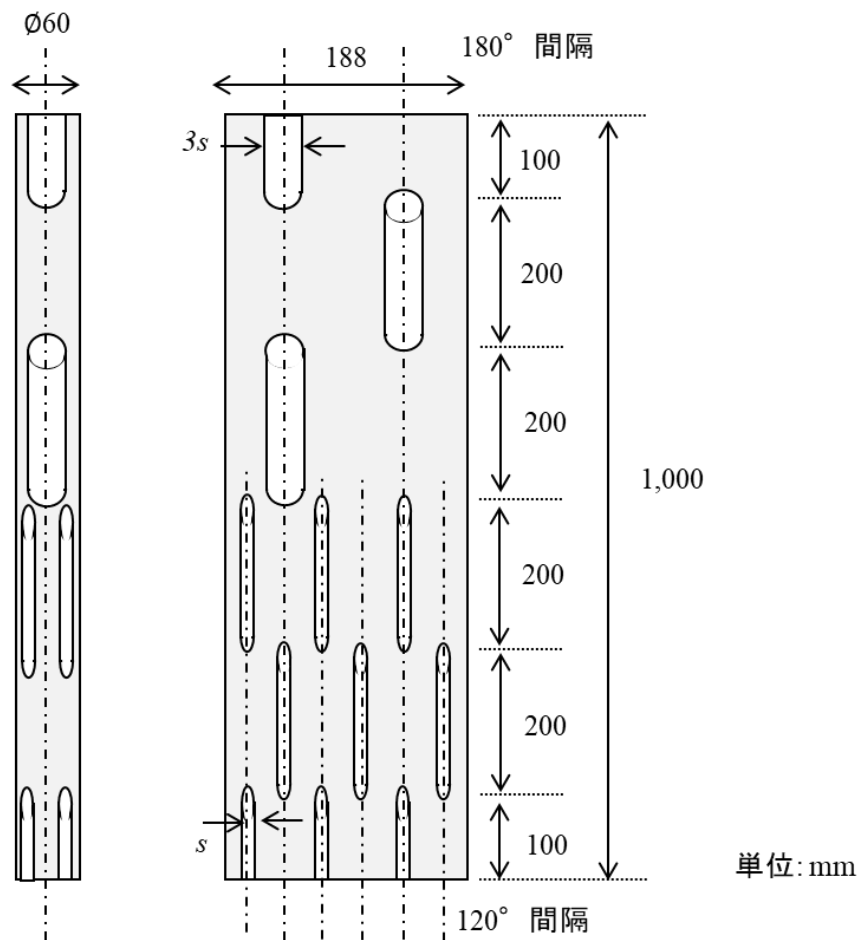


図-3.7 スリット付きパイプの正面図（左）と展開図（右）



図-3.8 三方向型(左)と軸対称型(右)の断面

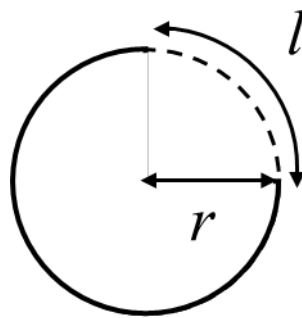


図-3.9 開口比の定義



図-3.10 スリーブとスリーブケース



図-3.11 バイブロハンマ本体

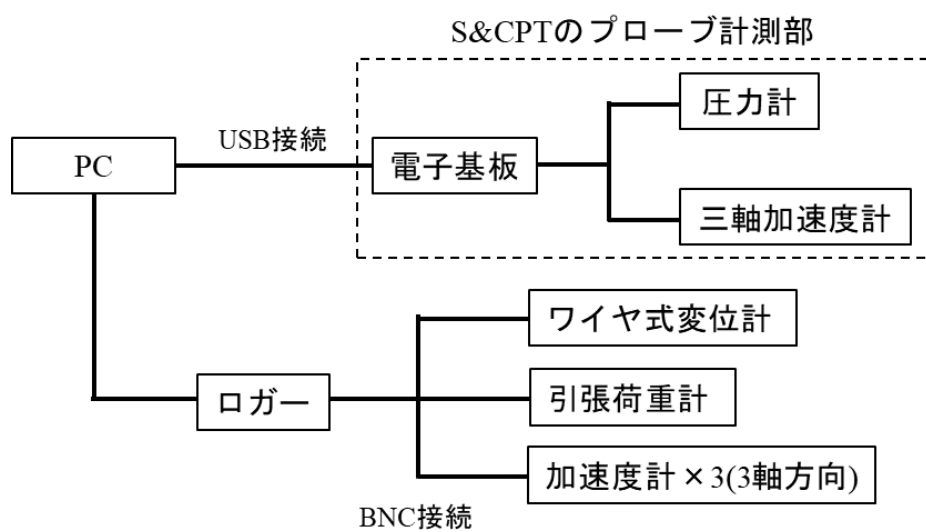


図-3.12 計測システムの構成



図-3.13 チャッキングプレートに装着した加速度計

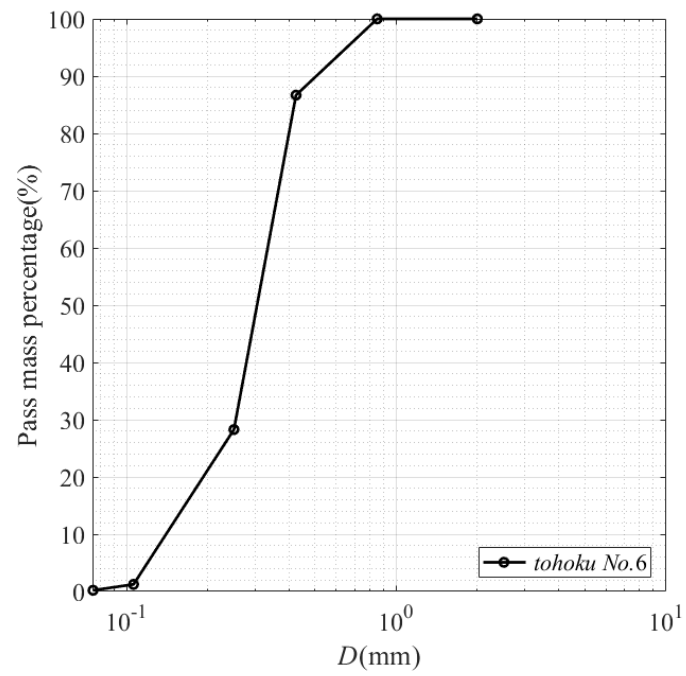


図-3.14 山形 6 号珪砂の粒径加積曲線

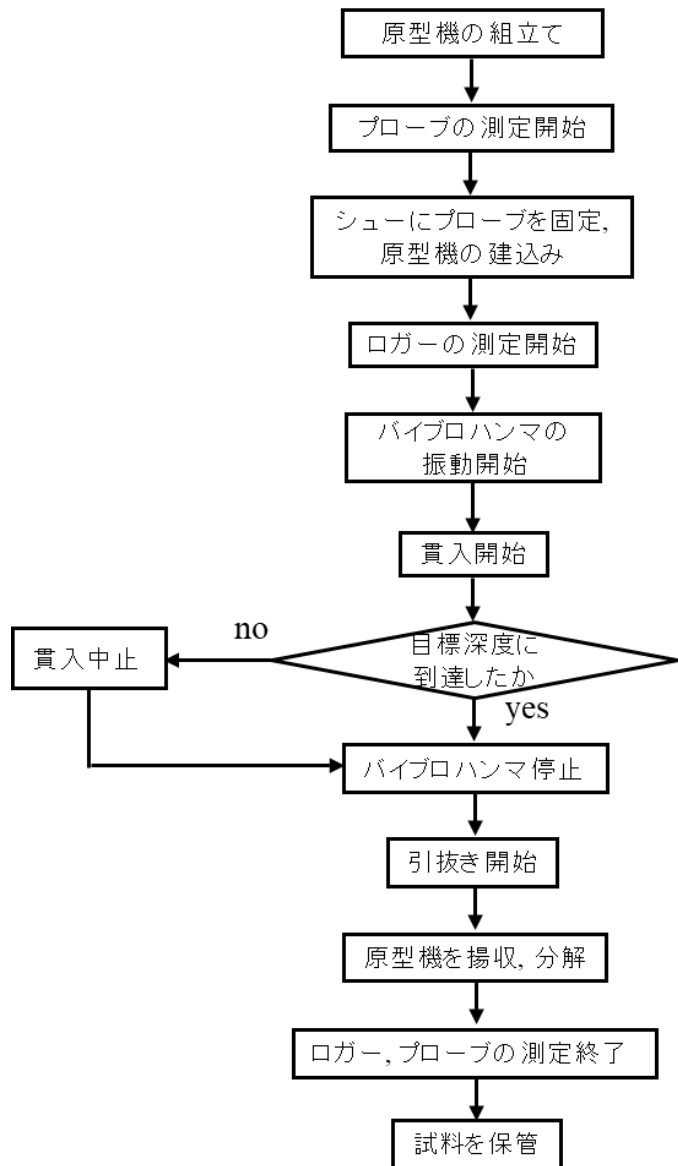


図-3.15 模型実験の手順

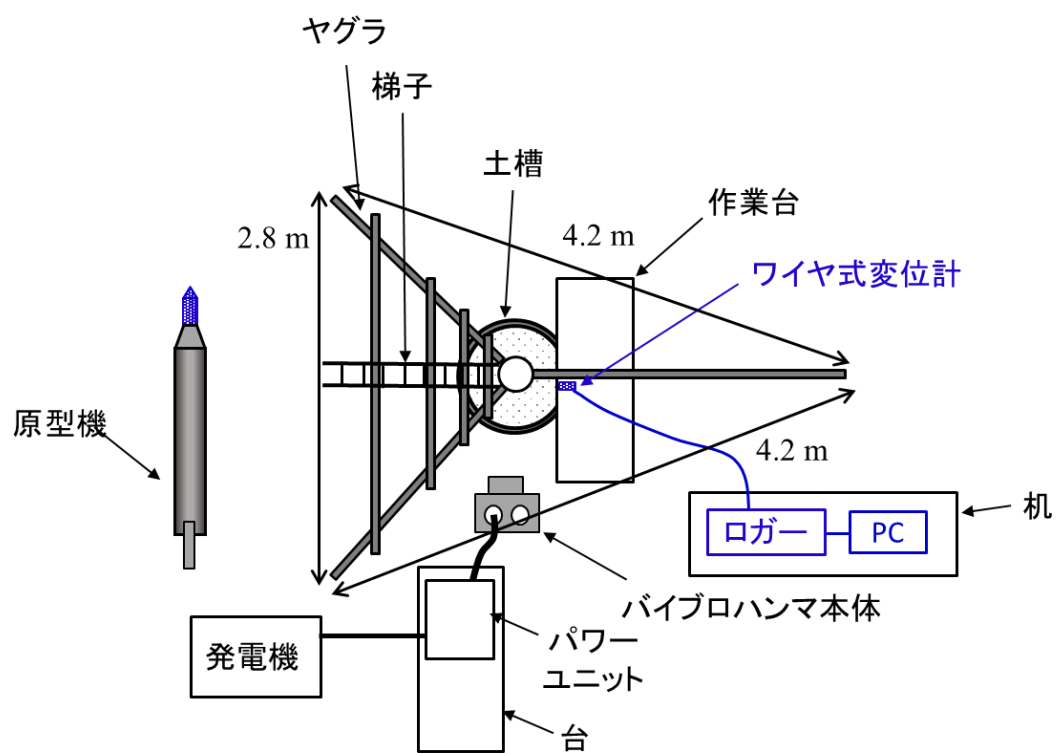


図-3.16 S&CPT の模型実験の平面配置

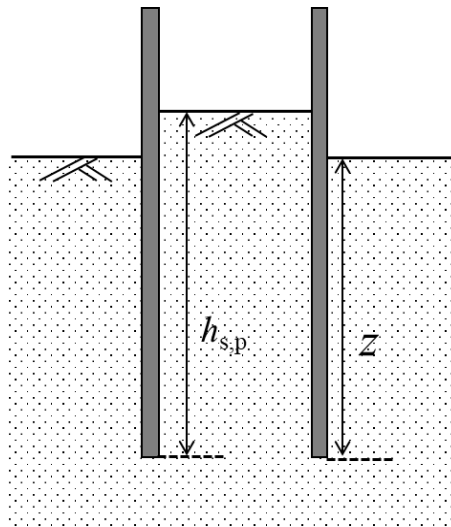
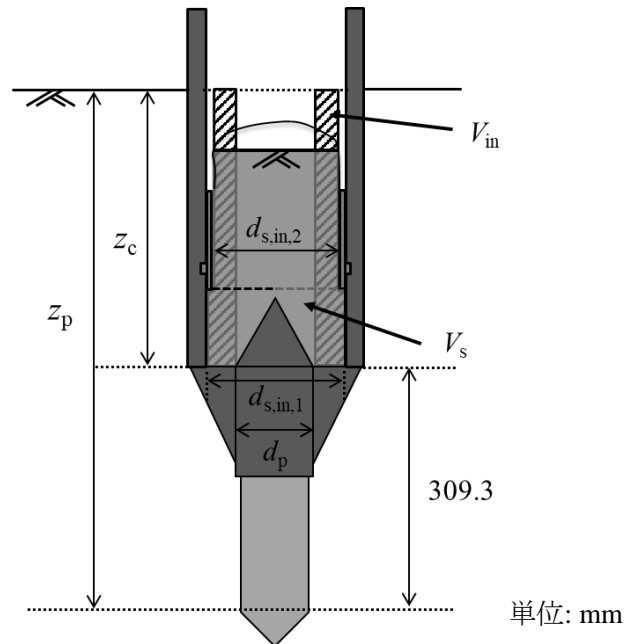


図-3.17 z , $h_{s,p}$ の定義



- z_p :プローブの貫入深度
- z_c :サンプリングチューブの貫入深度
- V_s :実際の採取された試料の体積
- V_{in} :理想的に採取される試料の体積
- $d_{s,in,1}$:シユーの内径 (100 mm)
- $d_{s,in,2}$:スリーブケースの内径 (92 mm)
- d_p :シユーの支持部の外径 (54 mm)

図-3.18 z_p , z_c , V_s , V_{in} の定義

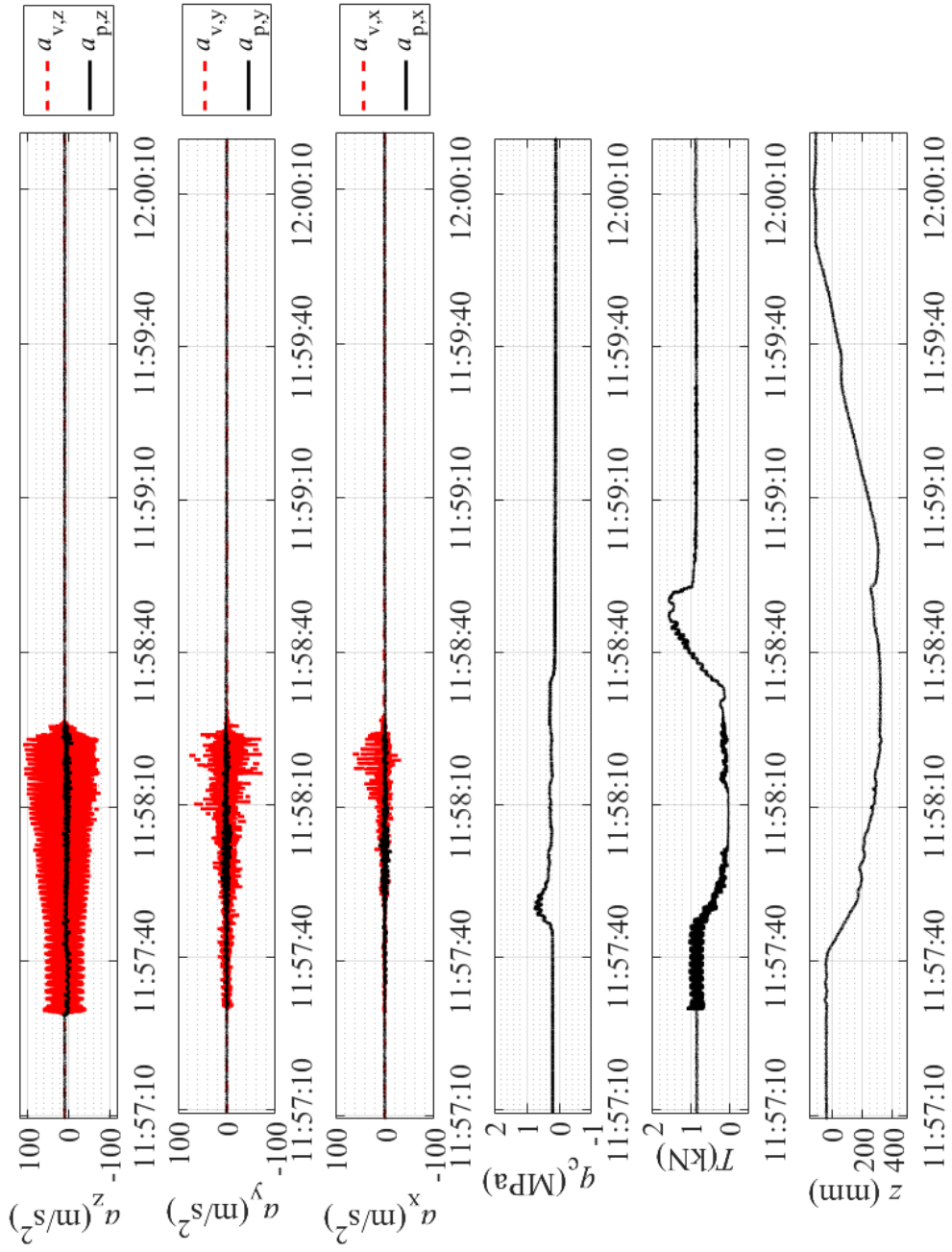


図-3.19 S&CPT-1 の時系列分布

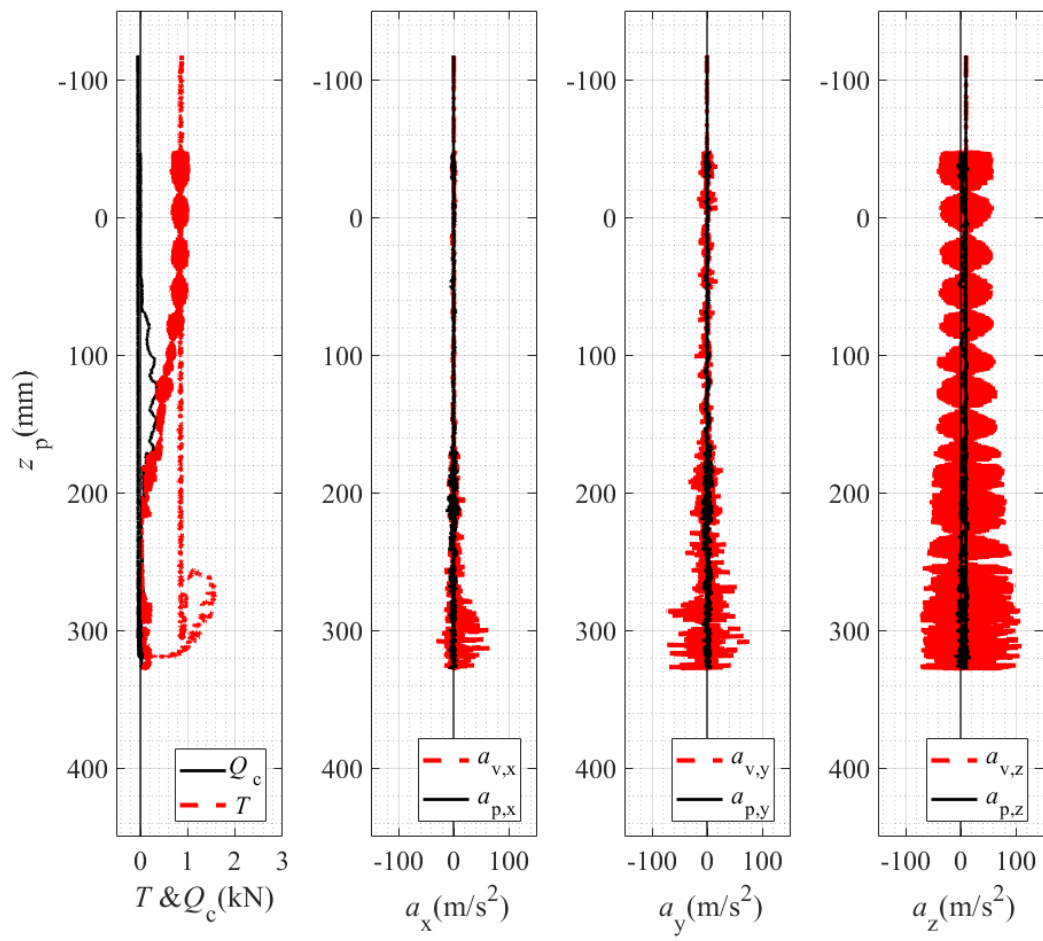


図-3.20 S&CPT-1 の深度分布



図-3.21 S&CPT-1 の揚収後のシュー

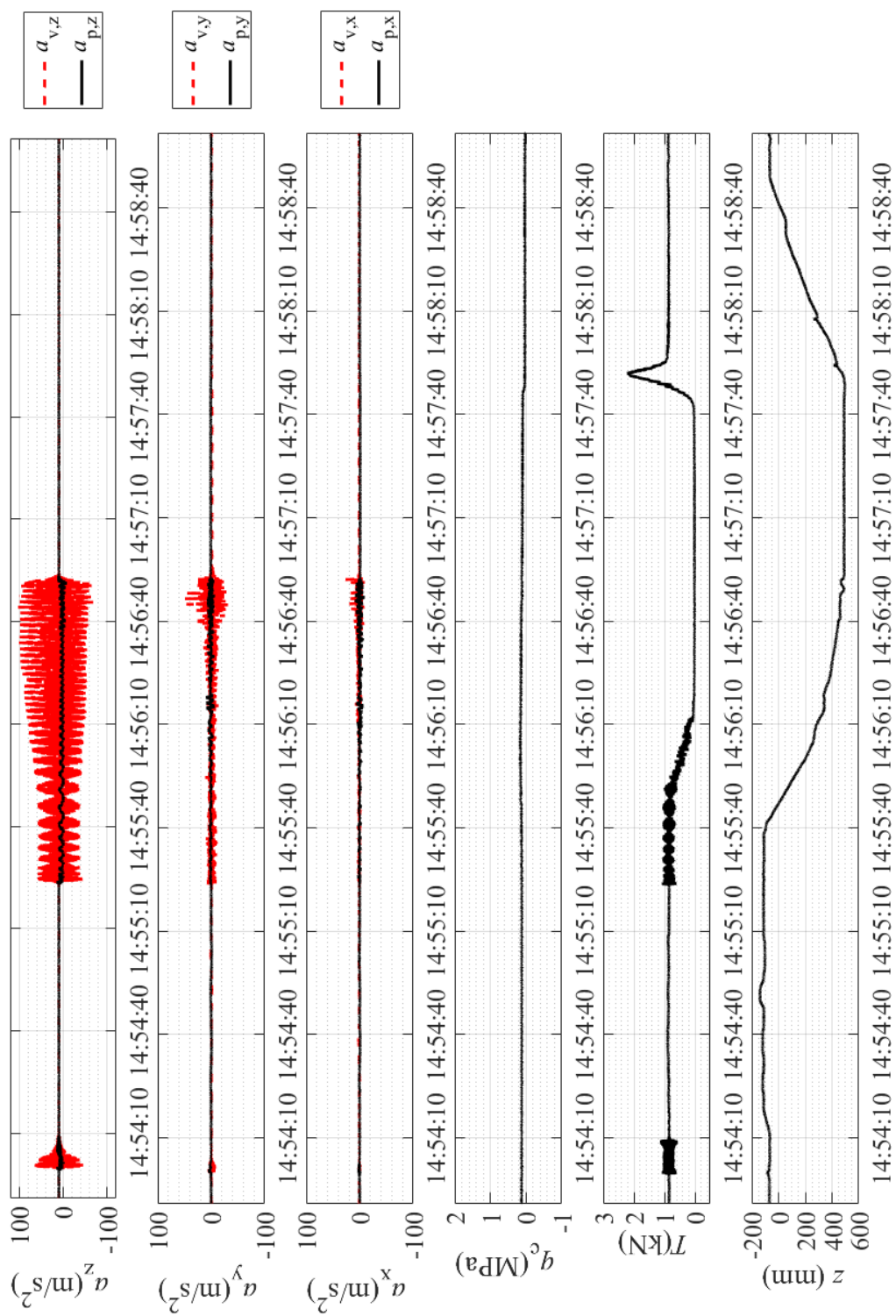


図-3.22 S&CPT-2 の時系列分布

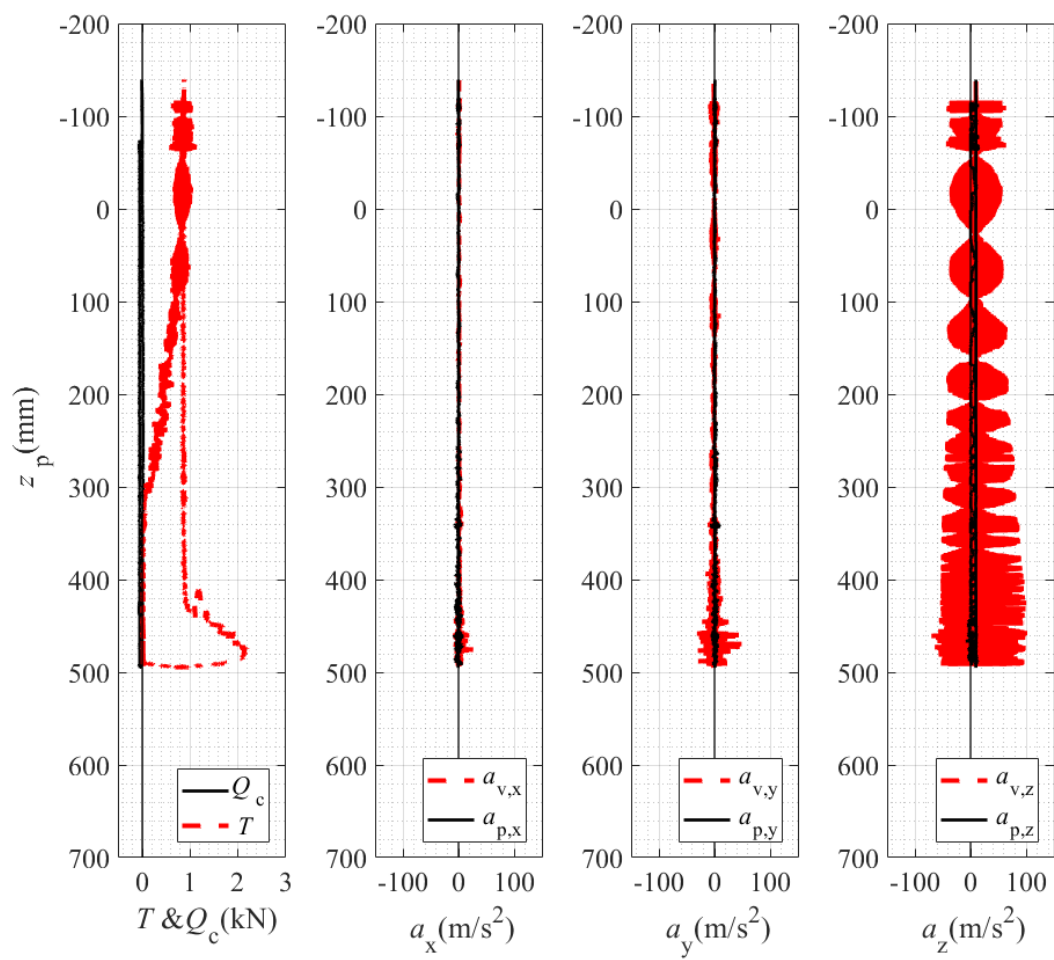


図-3.23 S&CPT-2 の深度分布



図-3.24 S&CPT-2 の揚収後のサンプラー

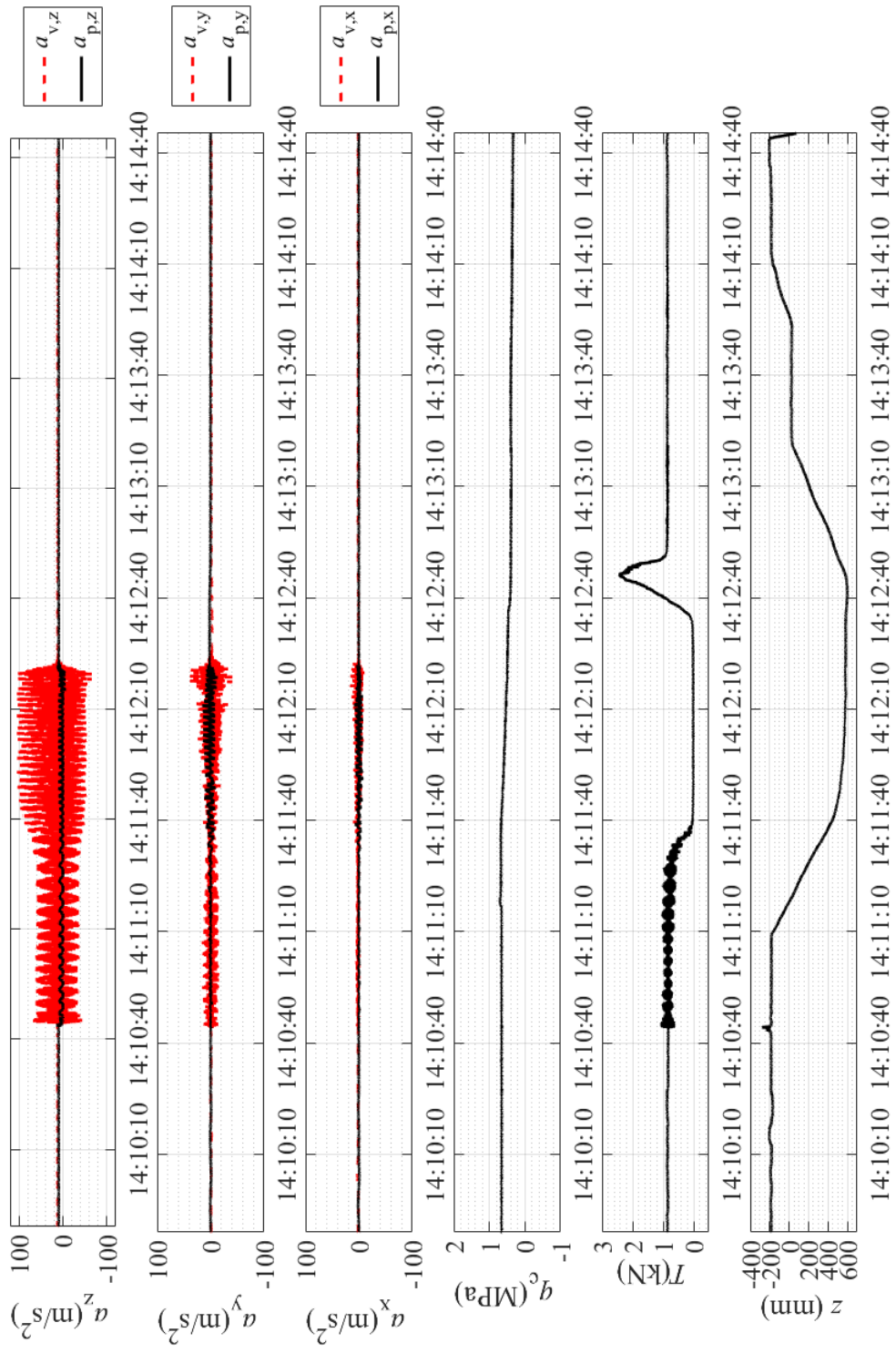


図-3.25 S&CPT-3 の時系列分布

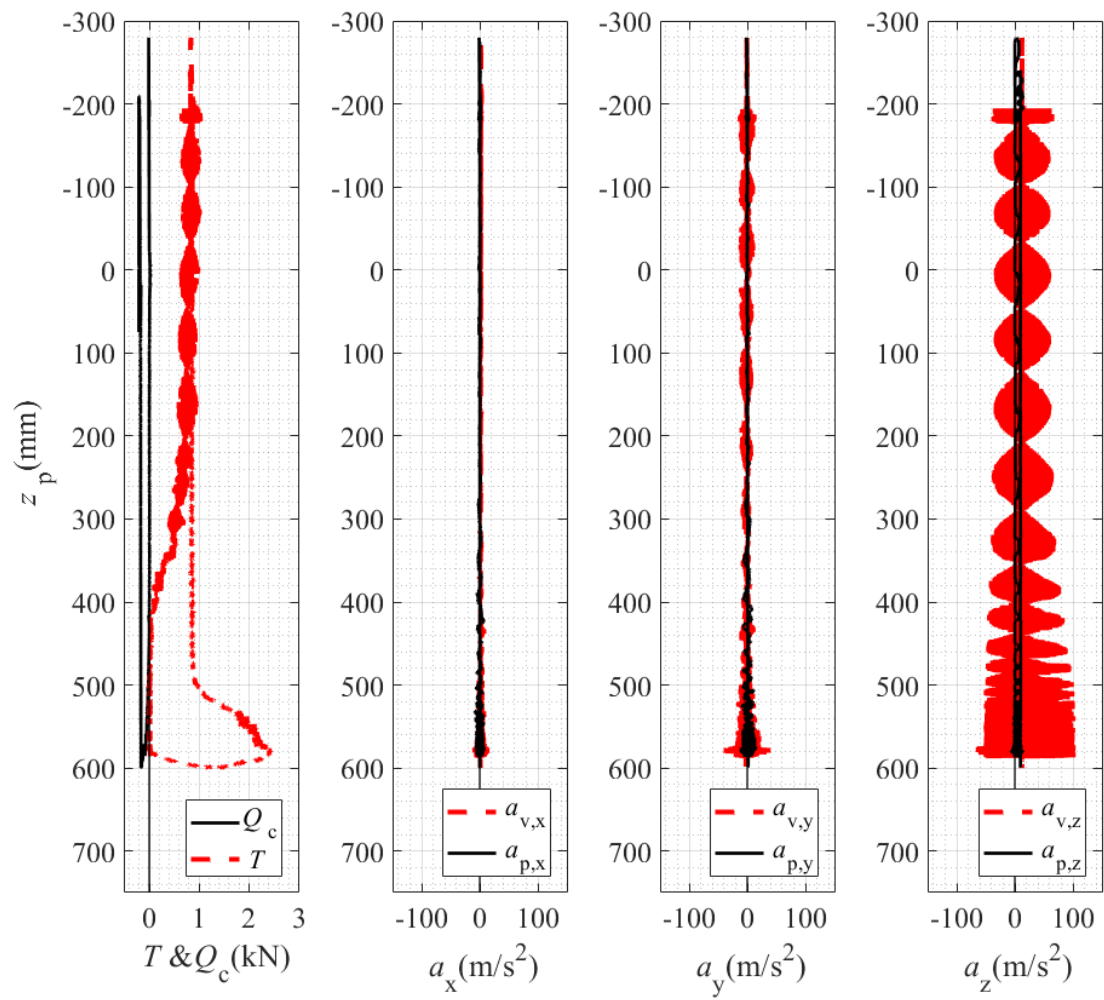


図-3.26 S&CPT-3 の深度分布

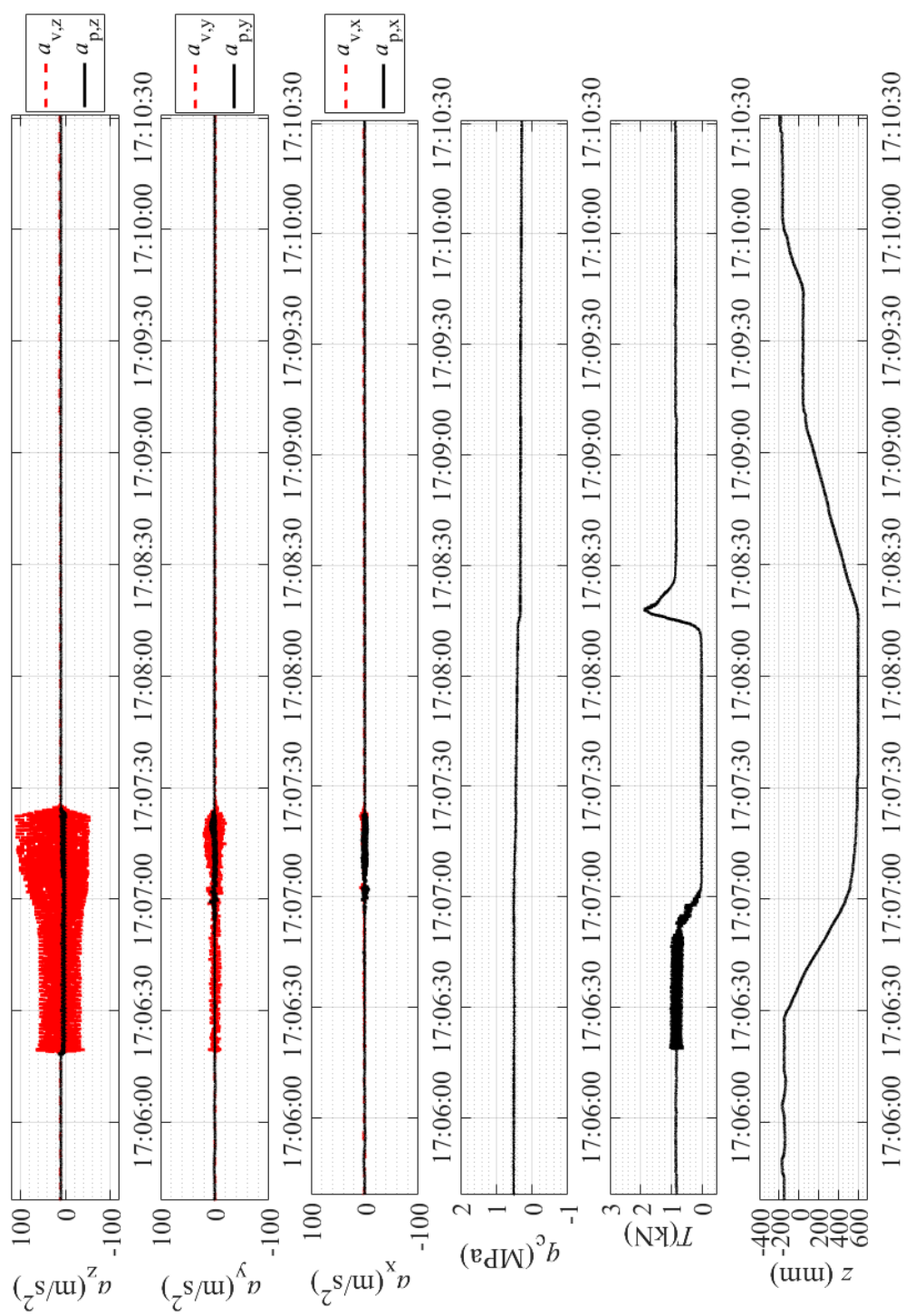


図-3.27 S&CPT-4 の時系列分布

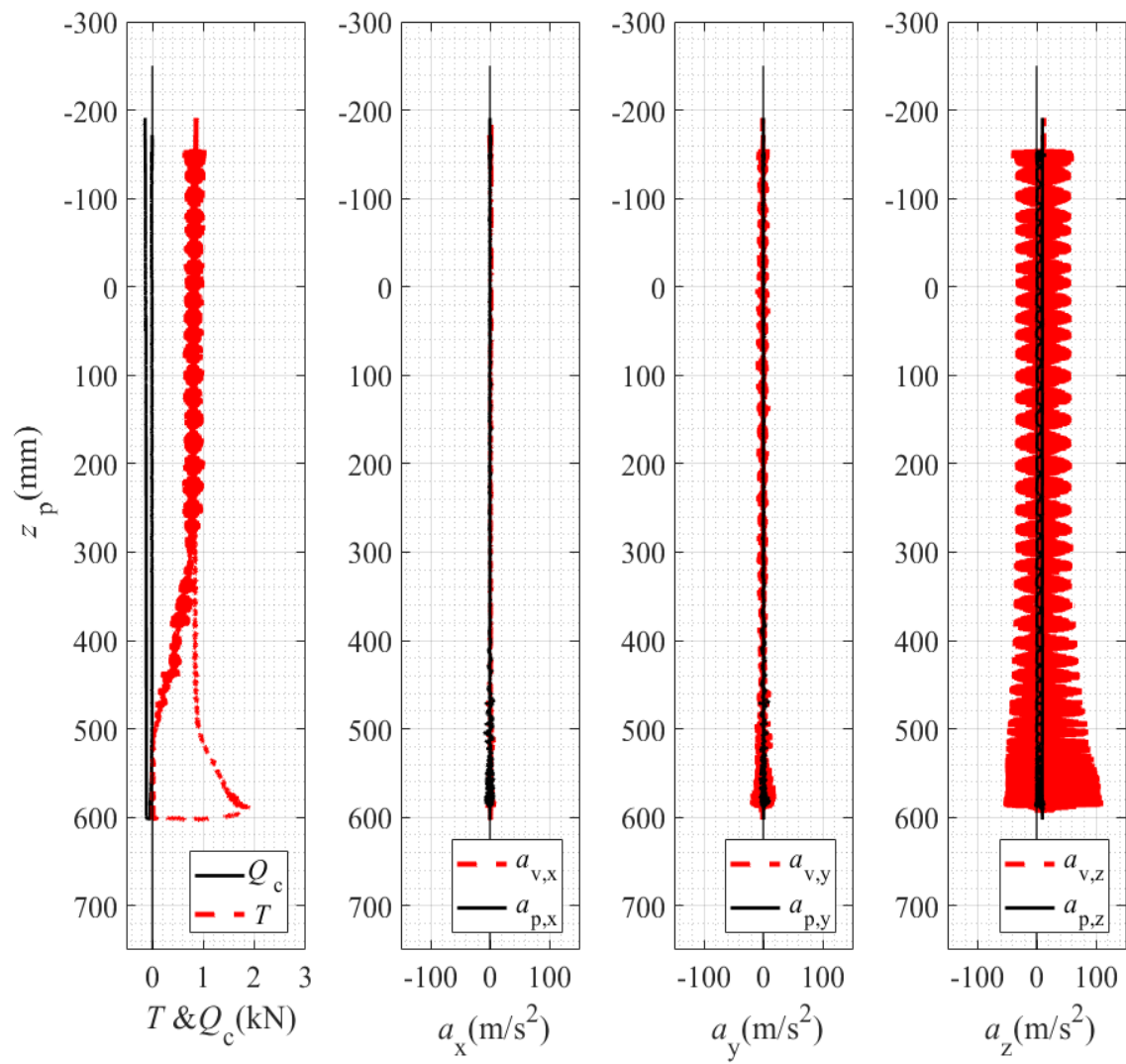


図-3.28 S&CPT-4 の深度分布

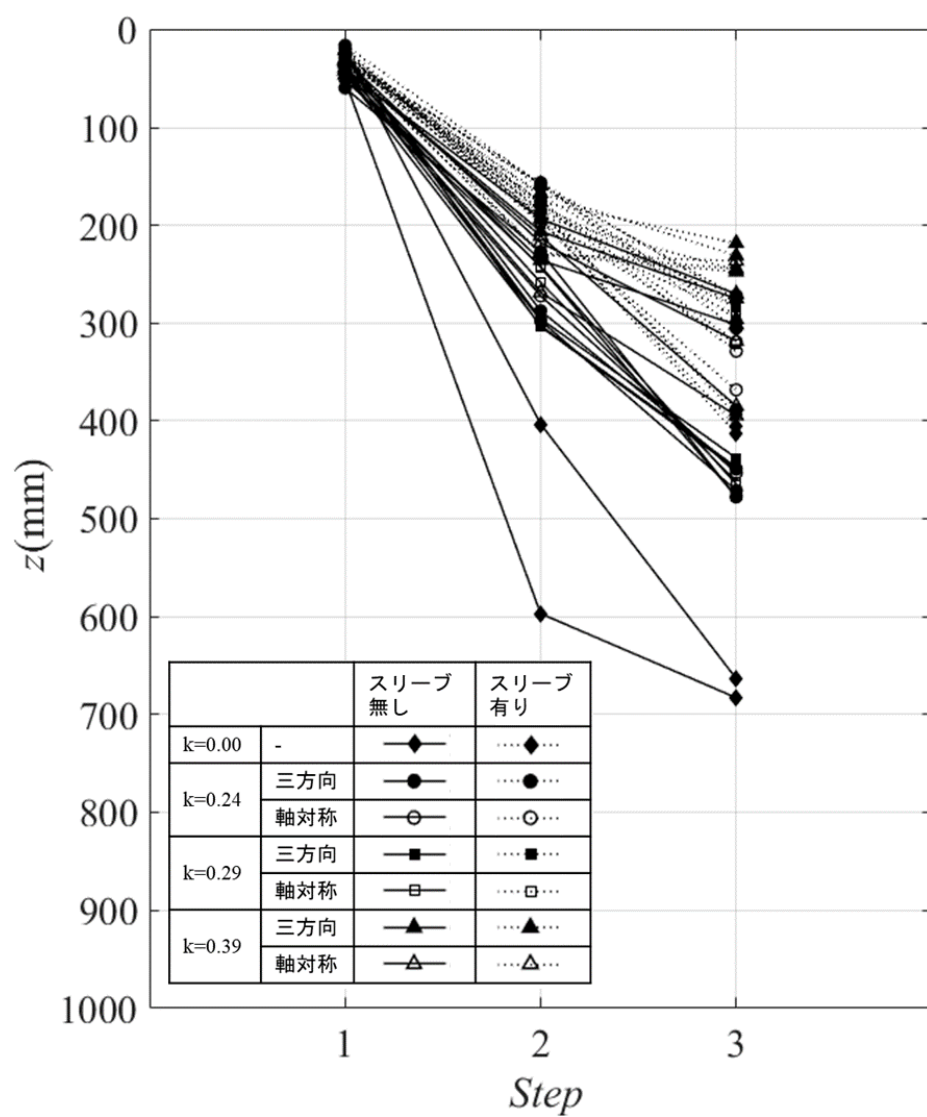


図-3.29 各ステップの貫入深さ

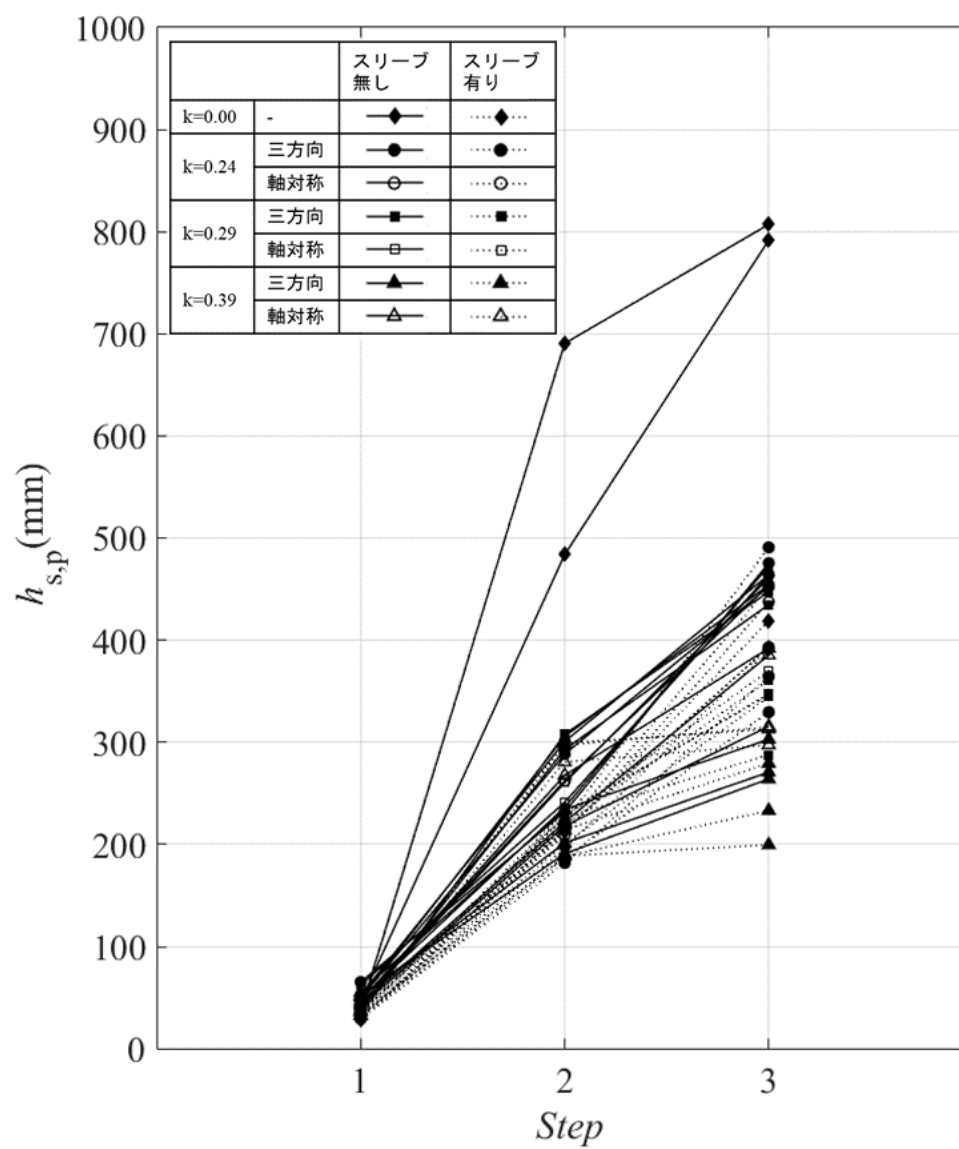


図-3.30 各ステップの試料高さ

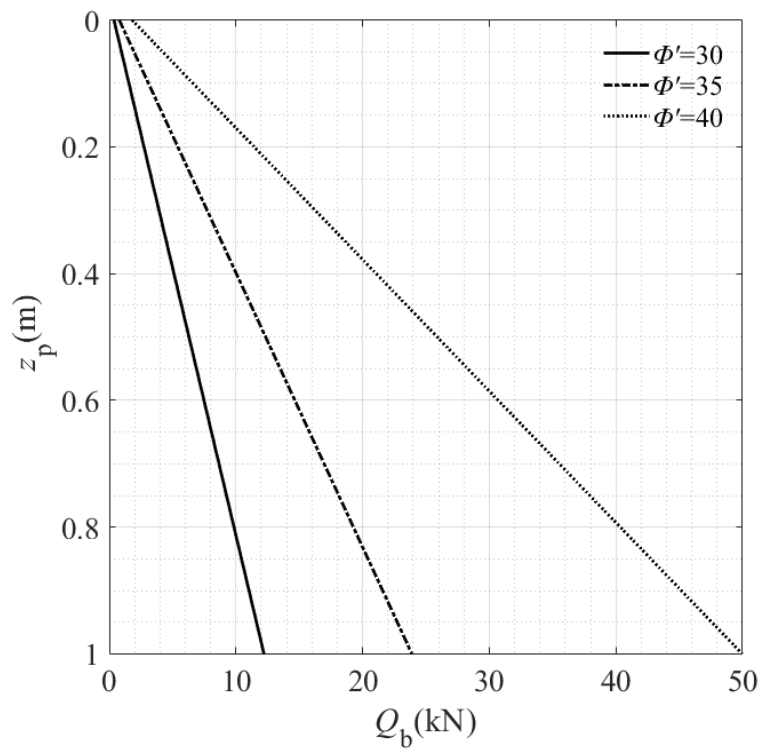


図-3.31 先端荷重 Q_b の推定

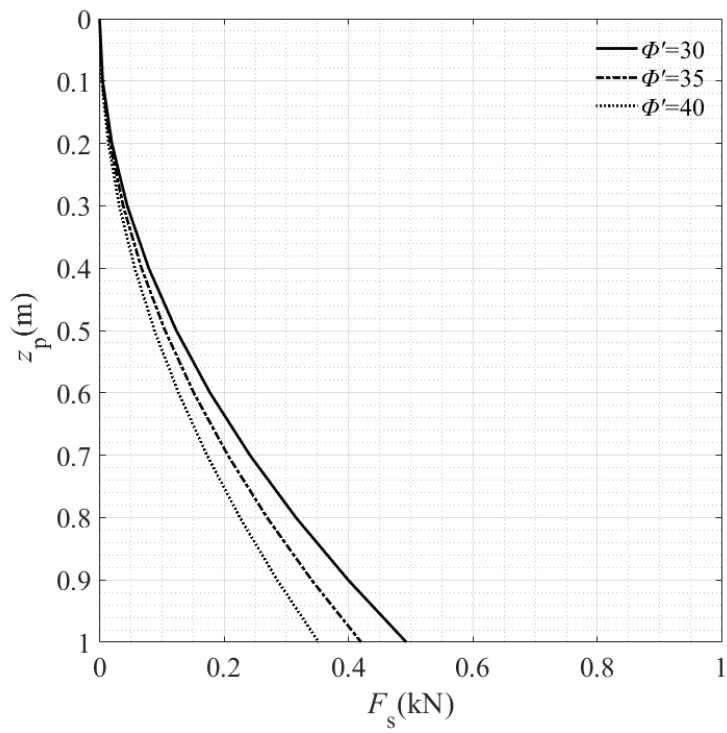


図-3.32 周面摩擦力 F_s の推定

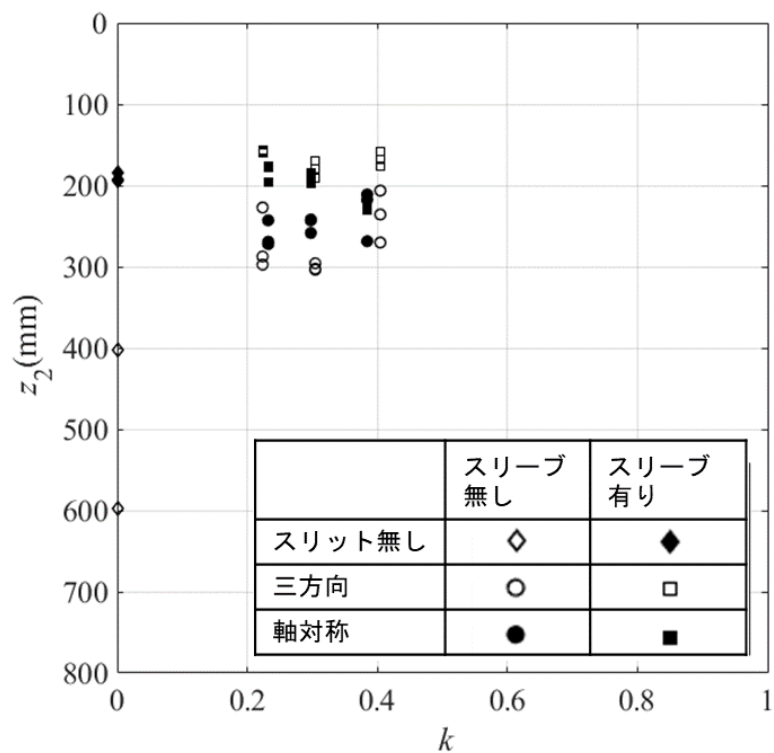


図-3.33 Step2 における貫入深さ z_2 と開口比 k の関係

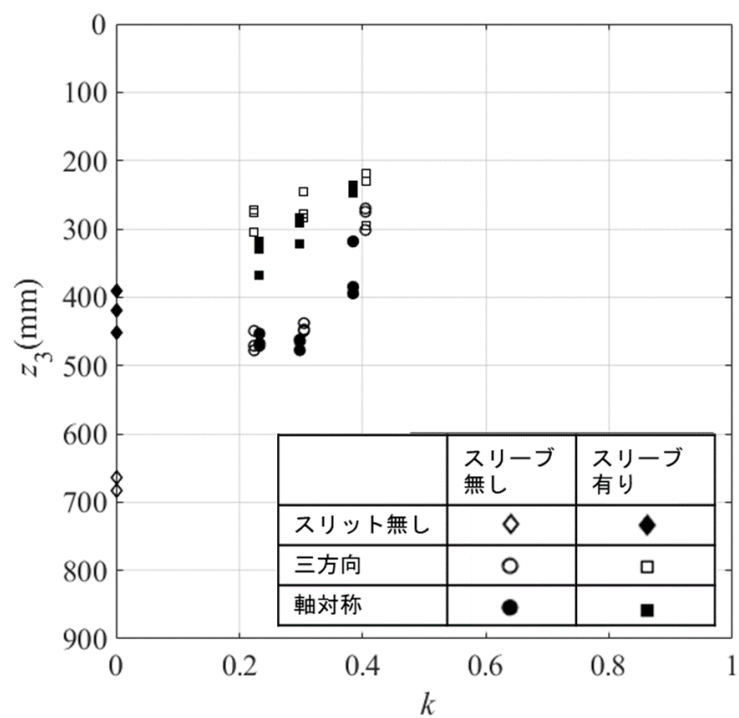


図-3.34 Step3 における貫入深さ z_3 と開口比 k の関係

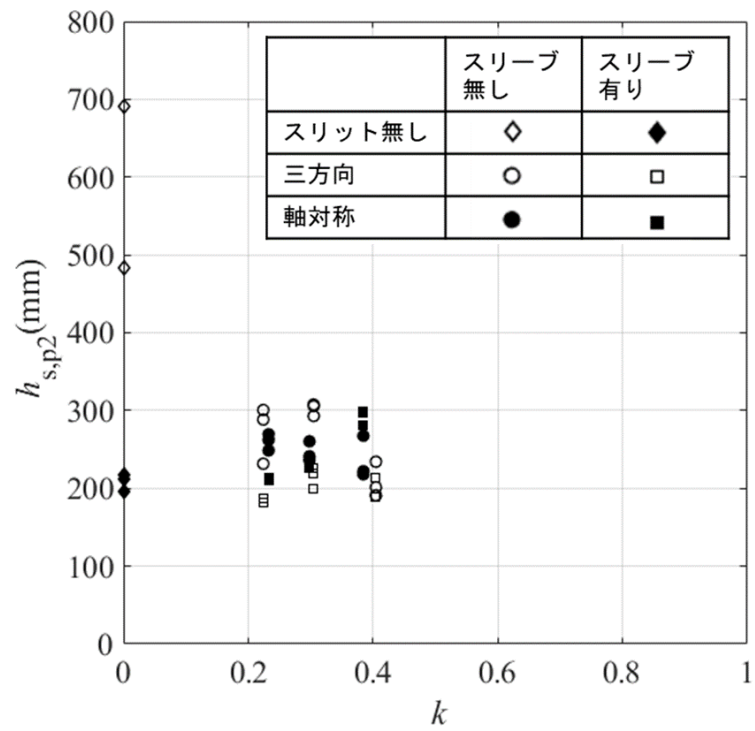


図-3.35 Step2 における試料高さ $h_{s,p2}$ と開口比 k の関係

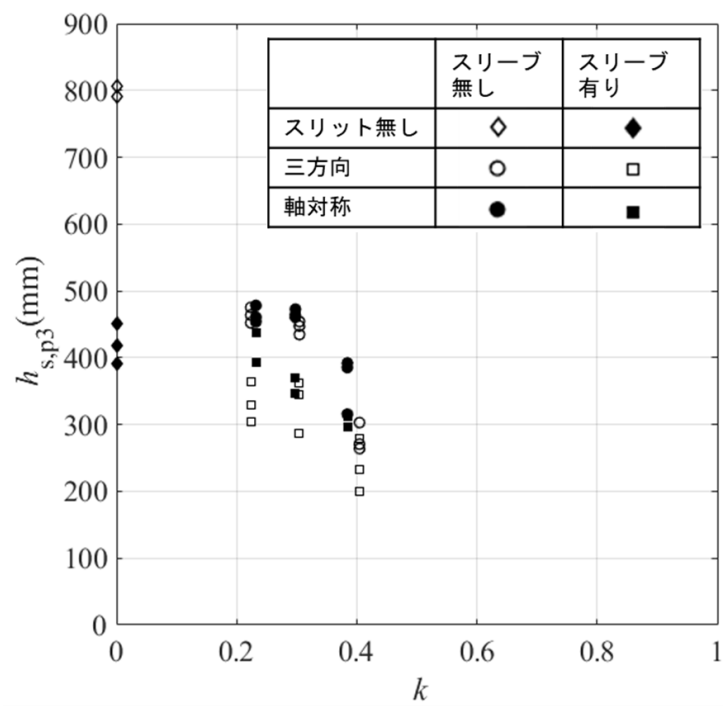


図-3.36 Step3 における試料高さ $h_{s,p3}$ と開口比 k の関係

第4章 S&CPT・S&PUTの原型機を用いた実地盤への貫入・引上げ実験

4.1 検討項目

実験に用いた S&CPT と S&PUT の原型機を図-4.1,2 に示す．この2種類のサウンディング方法に係る原型機を陸域の土質地盤に対して適用して，以下の項目について検討する．また，海域で試験を実施する場合に想定される課題を抽出する．なお，図-4.3 に貫入深さ z_p & z_c ，理想的に採取される試料と実際に採取された試料の体積 V_s & V_{in} の定義を示す．

① 貫入性

地上で計測した押込み荷重 Q または打撃回数 N とプローブの貫入深さ z_p の関係から，貫入方式が貫入性に及ぼす影響を検討する．

② サウンディング性能

プローブの貫入深さ z_p と S&PUT の先端抵抗力 Q_p または S&CPT のコーン貫入抵抗力 Q_c の関係を求め，これらと標準貫入試験（SPT）やコーン貫入試験（CPT）の結果から推定される地盤パラメータとの相関を検討する．

③ 試料の採取性

ケーシングの貫入深さ z_c と試料採取率 R_h の関係から，試験方法や貫入方式の違い，スリーブの有無などが試料の採取性を及ぼす影響を検討する．試料採取率 R_h (%) は，(4.1) 式に示すようにシェーの開口部を理想的に通過する試料の体積 V_{in} に対する実際に採取された試料の体積 V_s の百分率で表す． V_s は (4.2) 式， V_{in} は S&CPT の場合は (4.3) 式，S&PUT の場合は (4.4) 式を用いて求める．

$$R_h = \frac{V_s}{V_{in}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

$$V_s = \frac{mg}{\gamma_t} \quad (4.2)$$

$$V_{in} = \frac{\pi}{4} (d_{s,in,2}^2 - d_p^2) \cdot z_{c,max} \quad (4.3)$$

$$V_{in} = \frac{\pi}{4} (d_{s,in}^2 - d_r^2) \cdot z_{c,max} \quad (4.4)$$

④ 施工性

実験の各作業に要した時間と人数を調査し，SPT や CPT と比較する．

⑤ 安全性

実験中に事故発生の可能性を認知した作業（ヒヤリハット）をリストアップし，SPT や CPT と比較する．

4.2 実験方法

実施場所を図-4.4 に示す．茨城県稲敷市浮島地先で実施した． N 値が 4~25 程度の軟弱な地盤であるため，試験の実施が可能であることと，砂やシルトから成る単純な地層構成であるため，検

討する 2 つの試験方法を他の試験結果と比較しやすいことが理由である。

4.2.1 試験装置

(1) S&CPT

原型機を図-4.5 に、プローブの断面図を図-4.6 に示す。原型機はプローブ（先端コーン、計測部）、シュー（支持板、ガイドコーンなど）、サンプラー（スリーブ、スリーブケース、サンプリングチューブ）、逆止弁付き接続管、リデューサーより構成される。

プローブの計測部は、外径 48 mm の円筒状の鋼材であり、圧力計と加速度計を制御する電子基板（図-4.7 参照）を内蔵している。

シューは外径 114 mm、内径 100 mm の鋼材であり、内側の十文字の支持板でプローブを固定している。

ガイドコーンは、採取した試料がせん断によって膨張し閉塞すること防ぐことを目的としている。スリーブは、シュー開口部より入ってくる乱された試料を収納するために用いる。

スリーブケースは、高さ 115 mm、内径 92 mm の円筒状の鋼材であり、スリーブをサンプラーに固定するために用いる。

サンプリングチューブは外径 114 mm、内径 100 mm、1000 mm/本の鋼管である。

逆止弁付き接続管は、サンプラー揚収時に、試料の落下を防止するためのものである。

リデューサーは、貫入装置と原型機を固定するものである。

(2) S&PUT

原型機のロッド、ロッドカップリング（センタライザー無し、センタライザー有り）、シュー（山型テーパー、谷型テーパー）、ケーシングを図-4.8,9 に示す。プローブ（先端コーン、シャープピン、抵抗翼、ロードセル、スライダー機構など）、ロッド、ロッドカップリング、シュー、ケーシングより構成される。

先端コーンは径 68.1 mm、高さ 64.3 mm、先端角 60°の鋼材であるが、抵抗翼が展開する方向は径が 46.0 mm となっている。

抵抗翼は四角錐と長方形を繋げた形状の幅 20 mm、厚さ 15 mm の鋼材で、90°展開した際の孔壁への貫入長がそれぞれ 10 mm、20 mm、30 mm となるタイプがある。

シャープピンは、過大な荷重が抵抗翼に作用した場合に、破断することで抵抗翼が展開した状態からさらに下方へ回転して、抑留を防止するものである。

ロードセルは引張と圧縮両方の荷重を感知できるひずみゲージ式ロードセルで、容量は 10kN と 100kN のものがある。

スライダー機構は、ケーシングの打設によって抵抗翼を展開させるためのものである。

ロッドは外径 40.5 mm の鋼材である。

ロッドカップリングはロッド同士を連結する長さ 49.4 mm、外径 40.5 mm の鋼材であり、ケーシングに対するロッドの偏りを防止するセンタライザー付きのロッドカップリングを使用することもできる。

シューは、ケーシング下端に取り付ける長さ 150 mm、外径 89.1 mm の先端がテーパーを有する鋼管である。内壁にテーパーを有する谷型と、外壁にテーパーを有する山型がある。

ケーシングは、外径 89.1 mm の鋼管で、長さは 950.6 mm/本である。

4.2.2 計測システム

計測システムは、表-4.1 に示す計測機器とデータロガー（(株) 共和電業、ユニバーサルレコーダ EDX-200A）、PC で構成される。構成を図-4.10 に、圧力計、加速度計、ワイヤ式変位計、データロガーを図-4.11 に示す。

S&CPT の場合、計測項目はデータロガーで収録する地上計測データとプローブの電子基板で収録する孔内計測データに分けられる。孔内計測データは、コーン貫入抵抗 Q_c と三軸加速度 a_x, a_y, a_z (a_z が鉛直下向き正) であり、電子基板に挿入した microSD に保存される。データを回収する際は、地上で電子基板から microSD を取り外し、PC のソフトウェア (Pilot1.4) でデータの抽出を行なう。自記式となっており、測定の開始と終了は、地上で PC を介して行なう。

S&PUT の場合、先端抵抗 $Q_{p,raw}$ を含め全てのデータを地上計測データとして測定する。

鉛直変位 d はワイヤ式変位計によって測定する。ボーリングマシンの打撃部側面に取り付けられたアングル材に C 型クランプで固定し、地表面に置く重鎮とワイヤを繋ぎ、ワイヤの巻き取り分を測定する。

押込み荷重 Q は、ロードセルを原型機の上部に接続するロッドに取り付けて計測する。ただし、貫入方式が打撃の場合には、ロードセルが破損する恐れがあるため、計測していない。

4.2.3 貫入装置

使用したボーリングマシン (Geoprobe 6610DT, 最大押込み力 160 kN, 引抜き力 214 kN) を図-4.12 に、仕様を表-4.2 に示す。貫入方式は静的圧入と打撃の 2 種類があり、静的圧入の場合は $20 \pm 10 \text{ mm/s}$ で、打撃の場合は 1 秒当たりの打撃回数を最大 32 回まで手動で制御できる。静的圧入および引抜きを行う際、スクリーを 2 本打設し反力杭として利用する。

4.2.4 実験の手順

試験のフローをそれぞれ図-4.13,14 に示す。詳細な作業手順は以下の通りである。

(1) S&CPT

- a) 原型機の組み立てを行なう。端太角の上で、シュー、サンプリングチューブ、接続管、リデューサーを繋ぐ (図-4.15 参照)。スリーブを使用する場合は、スリーブを被せたスリーブケースをシューに固定する。スリーブの上端は、通気を許しつつ試料をスリーブに収容するためにビニールテープで開口部を 30 mm 程度にする。
- b) プローブ内の電子基板の制御ソフト (Pilot1.4) を PC 上で起動し、サンプリング周波数や測定時間、測定間隔を設定し、孔内計測を開始する。本実験では 30 分間の測定を連続して行うように設定する。サンプリング周波数は 10Hz を基本とし、打撃時のみ 100Hz とする。
- c) 組み立てた原型機のシューにプローブを固定し、geoprobe のプローブアセンブリの下に建て込む (図-4.16 参照)。原型機の上端 (リデューサー) にロードセルとプルキャップを接続し、ワイヤ式変位計の計測機器とロガーをケーブルで接続する。
- d) PC でロガーの制御ソフト (DCX-100A) を起動して、サンプリング周波数を設定する。10Hz を基本とし、打撃時のみ 100Hz とする。ロガーのモニタ測定で、出力されたデータを初期値として

記録する。原型機を懸垂した状態で 0 点合わせを行い、ロガーのデータ集録（地上計測）を開始する。

e) プルキャップを押込み用キャップに付け替え、geoprobe で原型機を貫入させる。この際、その時刻点での貫入深さと鉛直変位との関係が分かるように、100mm 貫入する毎に撮影しているビデオに音声を残す。

f) サンプリングチューブが 1 m 貫入し、目標深度に到達したら、貫入を終了する。サンプリングチューブがの貫入が困難になった場合、貫入を中止する。

g) 目標深度に到達していなければ、サンプリングチューブを継ぎ足して、引き続き 1 m 分の貫入を行う。

h) 原型機の上端にプルキャップを取付け、geoprobe の掛け金に引っ掛け、試験装置を引抜く。この時、シューから試料が落下しないように、ウェスやラップなどで被覆する。

i) 原型機の引抜き後、プルキャップ、リデューサー、逆止弁付き接続管を外す。サンプリングチューブ内の試料を確認し、サンプリングチューブ、シュー、プローブを角材（端太角）の上に横たえ、原型機を分解する。シューの内部に入っている試料は、バットに入れる。

j) ロガーのデータ集録（地上計測）を終了する。プローブの電子基板を PC に接続し、孔内計測を終了する。

k) 試料をサンプラーから取り出す。スリーブを装着する場合は、シューをサンプリングチューブから外し、スリーブごと試料を取り出す。装着しない場合は、サンプリングチューブの接続管側（貫入時の上方側）から試料を押し出す。押し出された試料はコア受け用の半割塩ビ管に入れる。試料は、ポリナイロン製袋に入れ、密封保存する。

(2) S&PUT

a) 原型機の組み立てを行なう。プローブのロードセルのケーブルを使用するロッド全てに通し、プローブ、1 本目のロッド、リデューサー、ロードセルを接続する（図-4.17 参照）。この時、ケーブルの長さに余裕があれば、ケーシングにケーブルを通しておいても良い。

b) 組み立てた原型機を geoprobe のプローブアセンブリの下に建て込む（図-4.18 参照）。原型機の上端（リデューサー）にロードセルとプルキャップを接続し、ワイヤ式変位計の計測機器とロガーをケーブルで接続する。

c) PC でロガーの制御ソフト（DCX-100A）を起動して、サンプリング周波数を設定する。10Hz を基本とし、打撃時のみ 100Hz とする。ロガーのモニタ測定で、出力されたデータを初期値として記録する。原型機を懸垂した状態で 0 点合わせを行い、ロガーのデータ集録（地上計測）を開始する。

d) プルキャップを押込み用キャップに付け替え、geoprobe で原型機を貫入させる。この際、その時刻点での貫入深さと鉛直変位との関係が分かるように、100mm 貫入する毎に撮影しているビデオに音声を残す。

e) ロッドを 1 m 毎に打設し、目標深度に到達したら、貫入を終了する。途中でロッドがたわむなどしてロッドの貫入が困難になった場合、貫入を中止する。

f) 目標深度に到達していなければ、ロッドの継ぎ足しを行ない、引き続き 1 m 毎に貫入を行う。

g) ケーシングを打設する。ロガーのデータ集録（地上計測）を一旦終了し、S&PUT 用ロードセ

ルのケーブルをケーシングに通す。1m 分のケーシングを建て込み、リデューサーと押込み用ヘッドをケーシングの上端に接続する。その後、データ集録を再開して打設を開始する。

h) ケーシングを 1m 毎に打設し、目標深度に到達したら、打設を終了する。途中で時ケーシングがロッドを押し込むなどしてケーシングの貫入が困難になった場合、打設を中止する。

i) 目標深度に到達していなければ、ケーシングの継ぎ足しを行ない、引き続き 1m 毎に貫入を行う。

j) 原型機の上端にリデューサー、プルキャップを貫入させたロッドの上端に取付け、原型機を 1m 分引抜く。

k) ケーシングが地上に 1m 以上出たところで、試料を回収する。チェーンレンチなどを用いて、ケーシングを回して取り外して引抜く。内側の試料が落下しそうな場合は、試料の外側をラップで被覆する。試料がロッドに付着している場合は、試料の形状変化や脱落を防ぐために、半割の塩ビ管を用いて試料を被覆する。ケーシングの内壁に付着している場合は、コア受け用の半割塩ビ管に押し出し、ポリナイロン製袋に密封保存する。この作業を、1m 毎に行う。

l) 原型機を引抜き、プルキャップ、リデューサーを取り外し、プローブの状態を確認して、ローガーのデータ集録（地上計測）を終了する。

4.2.5 ケース

S&CPT および S&PUT に関して検討したケースをそれぞれ表-4.3,4 に示す。

S&CPT においては、プローブの破損を懸念して、貫入方式は静的圧入 (20 mm/s)、プローブの最大貫入深さ $z_{p,max}$ は 1m を基本ケースとした。また、スリーブケースがサンプラー内の閉塞を促進させると考えられたため、スリーブ無しを基本ケースとした。SCPT-2 はスリーブの影響を検討し、SCPT-3 は貫入方式の影響を検討した。

S&PUT においても、プローブの破損や抑留を懸念して、貫入方式は静的圧入 (20 mm/s)、プローブの最大貫入深さは 2m、抵抗翼のタイプは孔壁への貫入長が 10 mm のタイプを基本ケースとした。センタライザーはケーシングをロッドに対して中心軸を合わせて打設するため、「有り」を基本ケースとした。しかし、ケーシング下端のシューがセンタライザーに乗り上げてロッドを押し込んでしまうことがわかったため、SPUT-2 以降のケースではセンタライザーのないロッドカップリングを使用した。抵抗翼を展開させるためのスライダー機構は、SPUT-1 と SPUT-2 の結果から不要であると判断したため、SPUT-3 以降のケースではスライダー機構は無しとした。

孔壁への貫入長が 10 mm の抵抗翼用いたケースでは、貫入時に対する引き抜き時の荷重が非常に小さかったため、サウンディング性能がないと判断し、SPUT-4 では 30 mm のものを用いた。また、SPUT-4 では両方の抵抗翼を孔壁に貫入させ展開させるために、鉛直に収納された状態から 9.4°展開した状態で貫入を開始した。

実験の詳細な実施場所と、実施地点、位置を図-4.19,20,21 に示す。各実施地点の間隔は 0.5 m とした。

4.3 実験結果

実験結果の一覧を表-4.5 に示す。

(1) S&CPT

①Case:SCPT-1

計測データの時系列分布と深度分布をそれぞれ図-4.22,23 に示す．時系列分布より,各作業の時刻とそれに伴うデータの挙動が整合することを確認した．9:41 と 10:07 のプローブのシューの固定と取り外しに伴う a_x , a_y の周期的な挙動や, 9:49 の原型機の建て込みに伴う a_z の重力加速度 9.8 m/s^2 への収束, 10:05 の原型機の倒置に伴う 0 m/s^2 への収束, 9:53 の先端コーンの接地に伴う q_p の微増などである．最大貫入深度は 1.38 m となった．

コーン貫入抵抗力は, 1 m 付近まで貫入深度とともに増加し, それ以深ではわずかに減少した．引抜き時の荷重は貫入深さによらずほぼゼロとなった．

押し込み荷重は, 貫入深さとともに増加し, 最大で約 100 kN となった．引抜き時には 20 kN 程度まで荷重の変動が見られ, 深度が浅くなるにつれて減少した．

水平加速度は, 貫入と引抜き両方で常にゼロに近い値を示した．

鉛直加速度は, 貫入時は常に重力加速度 9.8 m/s^2 に近い値を示したが, 引抜き時の $1.1 \sim 1.3 \text{ m}$ の深度においては周期的な変動が見られた．

採取した試料を図-4.24 に示す．試料の質量は 8.08 kg であった．貫入時には, コーン先端から 0.9 m の高さまでサンプリングチューブ内に試料が入っていることを確認した．

作業人数と所要時間を表-4.6 に示す．原型機の貫入に要した時間は約 1 分, 引抜きに要した時間は約 1 分であった．

②Case:SCPT-2

計測データの時系列分布と深度分布をそれぞれ図-4.27,28 に示す．時系列分布より,各作業の時刻とそれに伴うデータの挙動が整合することを確認した．13:29 と 13:53 のプローブのシューの固定と取り外しに伴う a_x , a_y の繰り返しの挙動や, 13:30 の原型機の建て込みに伴う a_z の重力加速度 9.8 m/s^2 への収束, 13:52 の原型機の倒置に伴う 0 m/s^2 への収束, 13:36 の先端コーンの接地に伴う q_p の微増などである．最大貫入深さは 2.43 m となった．

コーン貫入抵抗力は, 貫入深さ 0.9 m で最大となり約 1.2 m までは緩やかに減少し, ケーシングの継ぎ足し後は, 1.4 m 以浅と比べて非常に低い値を示した．

押し込み荷重は, 貫入深さとともに増加し, 最大で約 110 kN となった．

水平加速度は, 貫入と引抜き両方で常にゼロに近い値を示した．

鉛直加速度は, 貫入時と引抜き時ともに重力加速度 9.8 m/s^2 に近い値を示した．

採取した試料を図-4.25 に示す．試料の質量は 11.36 kg , スリーブ内の試料の長さは 1016 mm , 径は 96.4 mm であった．貫入時, コーン先端から 1.2 m の高さまでサンプリングチューブ内に試料が入っていることを確認した．

作業人数と所要時間を表-4.7 に示す．原型機の貫入に要した時間は約 5 分, 引抜きに要した時間は約 2 分であった．

③Case:SCPT -3

計測データの時系列分布をそれぞれ図-4.29 に示す．採取した試料を図-4.26 に示す．最大貫入深さは, 1.45 m であった．試料の質量は 11.82 kg , スリーブ内の試料の長さは 944 mm , 径は 96.3 mm であった．貫入時には, コーン先端から 1.2 m の高さまでサンプリングチューブ内に試料が入っていることを確認した．プローブのデータは収録できていなかった．

図-4.30 に示すように、揚収時、先端コーンの固定ピンが 1cm 程度飛び出し、先端コーンが計測部に押し込まれていた。貫入時、コーン先端から 1m の高さまでサンプリングチューブ内に試料が入っていることを確認した。

作業人数と所要時間を表-4.8 に示す。原型機の貫入に要した時間は約 8 分、引抜きに要した時間は約 1 分であった。

(2) S&PUT

①Case:SPUT-1

計測データの時系列分布と深度分布をそれぞれ図-4.31,32 に示す。プローブの最大貫入深さは 2.46 m であった。ケーシングは 2 本目の打設時、先端のシューがロッドカップリングのセンタライザーに接触し押し込まれることでロッドも下方貫入し始めたため、貫入を中止した。ケーシングの最大貫入深さは 1.49 m であった。

先端抵抗力は、ロッド貫入時に変動を示し 2.1 m で最大となる約 50 kN を示した。ケーシング打設時は 0.8 m まではゼロに近い値であったが、それ以深では急激に増加し 40 kN 前後の値を示した。引抜き時はロッドとケーシングともにどの貫入深さもほぼゼロに近い値を示した。無負荷状態の先端抵抗力の出力値は貫入前が-18.25 μ s、引抜き後が-117.3 μ s となった。

押込み荷重は、ロッド貫入時は貫入深さに伴って増加し 2.4 m で約 100 kN となった。ケーシング打設時は先端抵抗力と同様、0.8 m 以深で急激に増加し、100 kN 前後の値を示した。引抜き時には 1.2~2.4 m まで最大で 40 kN 程度値に変化が見られ、それ以浅はほぼゼロとなった。

採取した試料を図-4.33 に示す。試料の質量は 2.36 kg であった。

図-4.34 に示すように揚収時、抵抗翼は両方とも展開していた。ケーシング下端のシューは変形していた (図-4.35 参照)。

作業人数と所要時間を表-4.9 に示す。ロッド、ケーシングの貫入に要した時間はそれぞれ約 4 分、約 10 分であり、引抜きに要した時間は約 9 分であった。

②Case:SPUT-2

計測データの時系列分布と深度分布図をそれぞれ図-4.36,37 に示す。このケースでは、硬質な盛土地盤によって貫入不可となることを避けるため、実験によって既に一定の地盤情報を得た地下 0~0.8 m を省略した。具体的には、事前にオーガーで 0.8 m 程度掘削し、貫入深さ 835 mm からロッドの貫入を開始した。プローブの最大貫入深さは 1.47 m となった。2 本目のロッドを貫入する際に撓みはじめ、ロッドが破損することが懸念されたため、貫入を中止した。ケーシングの最大貫入深さは 1.04 m となった。ケーシングは 2 本目の打設時、ロッドも貫入し始めたため、打設を中止した。

先端抵抗力は、ロッド貫入時は変動を示し、1.2 m 付近で最大となり、約 40 kN であった。ケーシング打設時は 1.0 m 以深から値が大きくなり、最大で 20 kN 程度であった。引抜き時には、1.2~1.4 m では 5 kN ほどの値になったが、それ以浅ではほぼゼロとなった。無負荷状態の先端抵抗力の出力値は貫入前が-8.438 μ s、引抜き後が-50.69 μ s となった。

押込み荷重は、ロッド貫入時は貫入深さに伴って増加し、1.47 m で約 50 kN となった。ケーシング打設時は 1.0 m 以深から急激に値が増加し、最大で 60 kN 程度であった。引抜き時は 1.4 m 付近

で荷重の変動が見られるもの、それ以浅ではほぼゼロとなった。

図-4.38 に示すように揚収時、抵抗翼は片方のみが展開していた。

作業人数と所要時間を表-4.10 に示す。ロッド、ケーシングの貫入に要した時間はそれぞれ約 2 分、約 1 分であり、引抜きに要した時間は約 7 分であった。

③Case:SPUT-3

計測データの時系列分布と深度分布をそれぞれ図-4.39,40 に示す。ロッドの最大貫入深さは 10.21 m となった。ケーシングの最大貫入深さは 3.08 m となった。ケーシングは 2 本目の打設時、ロッドも貫入し始めたため、貫入深さ 2.04 m で打設を中断し、貫入方式を静的圧入から打撃(10~15Hz)に変更して打設を再開したところ、4 本目の打設時にロッドも貫入し始めたため、打設を中止した。その後、ロッドを引抜いたところ、ケーシングはロッドと同時に引き抜かれ、1 本のケーシングを回収した。2 本目のケーシングを引抜いたが、試料の閉塞によってケーシングを取り外すことが困難となり、3 本のケーシングとロッドをユニック車(クレーン付きトラック)を利用して引抜いた。この時はワイヤ式変位計を取り付けられなかったため、鉛直変位の測定ができていない。残ったロッド 6 本は Geoprobe によって引抜いた。

先端抵抗力は、ロッド貫入時、挙動の幅は大きく 4.0 m 付近では 70 kN 以上の値を示した。ケーシング打設時には、静的圧入時 (~2.04 m) では徐々に増加し、30 kN 程度まで増加した。貫入方式を打撃に切り替えた直後は大きく減少し、貫入深さが大きくなるにつれて徐々に増加し 3.08 kN で約 30 kN となった。引抜き時はほぼゼロとなった。無負荷状態の先端抵抗力の出力値は貫入前が-1.500 μ s、引抜き後が-107.33 μ s となった。

押込み荷重は、ロッド貫入時は増減の傾向は先端抵抗力と似ており、4.0 m 付近で最大約 80 kN となった。ケーシング打設時には、0.5 m 以深から急激に増大し、2.0 m 貫入時点で約 80 kN となった。引抜き時には、4~10 m では平均して 20 kN 程度であり、3.5 m 付近最大となり、約 25 kN となった。3.0 m 以浅ではほぼゼロとなった。

採取した試料を図-4.41 に示す。試料の質量は 7.61 kg であった。図-4.42 に示すように、スライダ機構がなくても揚収時に抵抗翼は片方が展開していた。

作業人数と所要時間を表-4.11 に示す。ロッド、ケーシングの貫入に要した時間はそれぞれ約 11 分、約 11 分であり、引抜きに要した時間は約 33 分であった。

④Case:SPUT-4

計測データの時系列分布と深度分布をそれぞれ図-4.43,44 に示す。ロッドの最大貫入深さは 10.14 m となった。

先端抵抗力は、貫入時は SPUT-3 と同様大きな挙動を示し、5.0 m 付近で約 60 kN となった。引抜き時、0~1 m と 6~10 m では増減の傾向が貫入時に近くなり、1~6 m では 10 kN 以下となった。無負荷状態の先端抵抗力の出力値は貫入前が-9.375 μ s、引抜き後が-87.688 μ s となった。

押込み荷重は、貫入時と引抜き時両方の増減の傾向が先端抵抗力と似ており、5.0 m 付近で最大約 70 kN であった。

図-4.45 に示すように抵抗翼は両方とも展開していた。

作業人数と所要時間を表-4.12 に示す。ロッドの貫入に要した時間はそれぞれ約 18 分であり、引

抜きに要した時間は約 15 分であった。

(3) 他の試験

①Case:SWS-1

スウェーデン式サウンディング試験の深度分布を図-4.46 に示す。地表面を除き 3.5 m まで載荷した荷重は 1000N となった。1 m 当たりの半回転数は 0.5~3.0 m では全て 200 半回転以上となった。換算 N 値の算出に用いた式は、三木式^{k)}、稲田式（砂質土）^{l)}、稲田式（粘性土）^{l)}、松浦・西村式（まさ土）^{m)}である。それぞれを (4.5) 式、(4.6) 式、(4.7) 式、(4.8) 式に示す。

$$N = \frac{1}{12} N_{sw} \quad (4.5)$$

$$N = 0.067 N_{sw} + 2 \quad (4.6)$$

$$N = 0.05 N_{sw} + 3 \quad (4.7)$$

$$N = 1.069 N_{sw}^{0.58} \quad (4.8)$$

②SPT の N 値, CPT, SWS からの換算 N 値

SPT の土質柱状図と N 値及び CPT と SWS の換算 N 値の深度分布を図-4.47 に示す。

4.4 考察

実験を実施した茨城県稲敷市浮島周辺の地層は、地表面から GL-5 m は細砂と礫混じり細砂から成る N 値が 4~25 程度の盛土地盤である。図-4.47 から分かるように、実施地点によって試験結果のばらつきが大きい。一方、GL-6 m 以深は細砂やシルトから成る N 値が 5~12 の軟弱な沖積地盤（完新統）である。浮島周辺の地盤は、1 万年前から現在に至るまで、離水と水没を繰り返しながら細粒分や粗粒分が堆積することで形成されているため、地層構成や地盤の特徴は地点に左右されにくく、SPT や CPT の試験結果と比較することが可能であると考えられる。

(1) S&CPT に関する考察

① 貫入性

1 m 貫入させるのに押込み荷重は約 100 kN となり、CPT（コーンの径 35~36 mm）と比べて径が大きい S&CPT（先端コーンの径 49 mm）は貫入性が良くないと考えられる。サンプラーの断面積が小さくなるような形状を用いることで改善できると考えられる。

② サウンディング性能

図-4.23, 28 に示すように SCPT-1 と SCPT-2 で 0.9~1.0 m で貫入抵抗力が最大となり、それ以深では減少する傾向は、図-4.47 の SPT の N 値, SWS の結果と比較しても同様の増減の傾向が見られることから、盛土の中密な地盤の性状を反映していると考えられる。しかし、SCPT-2 の 1.4 m 以深ではコーン貫入抵抗力はほとんどゼロとなっていることから、閉塞したシューが地盤からの抵抗を受け持ち先端には荷重が作用しなくなったと考えられる。SCPT-3 でプローブのデータが収録できなかった原因は、先端コーンに過大な荷重がかかり、打撃貫入がプローブに過大な荷重を与えたことによる圧力計の故障が考えられた。

③ 試料の採取性

SCPT-2 と SCPT-1 では最大貫入深さが約 1m 違うにもかかわらず、採取した試料の質量は 3kg

程度しか差がなく、試料採取率も SCPT-2 が SCPT-1 よりも 30% 低かったことから、シュー内部では閉塞が生じていると考えられる。閉塞が顕著に生じる深さは、サンプリングチューブの 2 本目の打設から、すなわち 1.4 m 以深であると考えられる。

SCPT-1 よりも SCPT-3 がより試料採取率が約 35% 高かったことから、試料採取には静的圧入よりも打撃が適しており、またスリーブの有無は試料採取率に大きな影響は与えないと考えられる。

④ 施工性

計測者、貫入装置のオペレーター、試験装置の運搬・設置等の作業者を含めた 3 人で試験を実施した。貫入方式が静的圧入 (20 mm/s) の場合、表-4.6,7,8 の貫入・引き抜きには 1 m 当たり約 1 分かかった。打撃の場合は貫入に約 8 分かかり、静的圧入の場合と比べて施工性が悪いことがわかった。スリーブを付けた場合、試料の回収にかかる時間を短縮できるため施工性が良いと考えられる。

⑤ 安全性

事故発生の可能性を認知した作業は、以下の通りであった。

- ・試験装置の倒壊によるはさまれや衝突
- ・試験装置へのつまずきによる転倒
- ・貫入装置のプロブアセンブリの動作によるのはさまれや巻き込み
- ・掘削孔への転落

これらは CPT や SPT にも共通する項目であり、安全管理規定に則れば安全な試験であると考えられる。

(2) S&PUT に関する考察

① 貫入性

SPUT-1 の結果から、ロッドが深く貫入していくにつれて鉛直状態を保持できなくなり、ケーシングがセンタライザーに接触すると、ケーシングの打設が阻害されることがわかった。よってセンタライザーは不要であると考えられる。

SPUT-2 の結果から、ロッドを 3m 分貫入させることはできず、プロブのスライダー機構が受圧面積を大きくし、支持力を増大させていることが原因と考えられる。

SPUT-3 の結果から、ロッド貫入時の押込み荷重が、先端抵抗力和増減傾向が似ており、ロッド貫入時は周面摩擦が小さいことがわかった。ケーシング打設時は静的圧入で 2 m 程度、打撃を用いても 3 m (10~15Hz) 程度しか貫入させることができず、その際の押込み荷重はロッド貫入時よりも大きく約 100 kN であった。

SPUT-4 の結果から、センタライザー、スライダー機構がなければ、N 値 10~20 程度の緩い砂質地盤に対し、ロッドは 20 mm/s の静的圧入で 10 m 貫入させることができることがわかった。

② サウンディング性能

SPUT-1, SPUT-2, SPUT-3 のいずれにおいても、引抜き時に荷重の挙動はほとんどみられなかった。抵抗翼は展開していたにもかかわらず先端抵抗力和大きな挙動が見られなかった原因は、ロッドないしケーシングの貫入によって周辺の地盤が乱されたことが考えられた。

SPUT-3 の結果から、スライダー機構がなくとも翼先が孔壁に貫入していれば、抵抗翼を展開でき

ることがわかった。また、受圧面積が大きくなるスライダー機構は押し込み荷重が大きくなるため、不要であると考えられる。

SPUT-4 では、引抜き時 6~9 m においては先端抵抗力の増減傾向は CPT のコーン貫入抵抗の結果と相似になっていたが、それ以浅では先端抵抗力はほぼゼロとなった。

図-4.48 に N 値と 0.3 m 毎の平均値 Q_p/A の関係を示す。 A は孔壁に貫入する抵抗翼の上部面積 ($A=808\text{ mm}^2$) である。 GL0~5 m (図中○と●) ではピアソンの相関係数は $r=-0.15$, -0.02 と無相関で、 GL-5~-10 m (図中□と■) では $r=0.71$, 0.32 となり引抜き時の方が強い相関を示し、 N 値と Q_p/A の最小二乗法による回帰式 $N=0.58 (Q_p/A)$ が求められた。

図-4.49 に CPT による測定コーン貫入抵抗 q_c と 0.1 m 毎の平均値 Q_p/A の関係を示す。貫入時の盛土中と沖積地盤中におけるピアソンの相関係数(図中●と■)は $r=0.47, 0.52$ だが、引抜き時、GL0~5 m の盛土中 (図中○) の相関性は $r=-0.27$ と低かった。そこで沖積地盤である GL-5~-10 m において考察するため、図-4.50 に鉛直全応力で無次元化した測定コーン貫入抵抗 q_c と引抜き時の Q_p/A の関係を示す (但し、1m 毎のロッドの取り外し部分のデータは除く)。SPT の土質柱状図より、GL-5.0~-6.4 m は砂質シルトとシルト質細砂、GL-6.4~-8.5 m は暗灰色の細砂、GL-8.5~-10.1 m は暗緑灰色の細砂が主に分布する地層であると判断した。シルト中 (図中□) では、 $r=-0.52$ となり逆相関を示し、それ以深の細砂 A, B の 2 層 (図中△と▼) では相関係数が $r=0.61$, 0.75 と高く、この 2 層における q_c と Q_p/A の最小二乗法による引抜き時の回帰式 $q_c/\sigma_{v0}=0.48Q_p/A\sigma_{v0}$ が求められた。

以上のことから、細砂層が分布する沖積地盤に対しては、CPT の q_c と相関のあるサウンディング、シルトや細砂からなる沖積地盤に対しては、SPT の N 値と相関のあるサウンディングが可能であると考えられる。

③試料の採取性能

全てのケースにおいてケーシングを予定していた貫入深度まで打設することはできなかった。ケーシングを打設すると、容易にケーシング内で閉塞が起こり、ロッドとともに下方貫入していくことがわかった。試料採取率 R_h はいずれのケースにおいても 30%に至らず、閉断面の形状はサンプラーには不適であると考えられた。打撃貫入の場合には、静的圧入 (SCPT-1) と比べて 10%程度試料採取率の向上が見られたが、管内の閉塞はより顕著となった。

④施工性

計測者、貫入装置のオペレーター、試験装置の運搬・設置等の作業者を含めた 3 人で試験を実施した。貫入方式が静的圧入 (20 mm/s) の場合、表-4.9,10,11,12 からわかるように、ロッドの貫入・ケーシングの打設には 1 m 当たり約 2 分要し、引抜き及び試料の回収には 1m あたり約 3 分要することがわかり、SPT (1m 分の調査に約 20 分) よりも施工性が良いことがわかった。

⑤安全性

事故発生の可能性を認知した作業は、S&CPT と同様であった。CPT や SPT にも共通する項目であり、安全管理規定に則れば安全な試験であると考えられる。

(3) サンプルング機構の改善策

解決策として、3 つのサンプルング方法を提案する。特徴及び利点、欠点を表-4.13 に示す。い

ずれも、閉塞を引き起こす閉断面のサンプラーを用いない形式であることが共通点である。

ケース回転型の概要を図-4.51 に示す。試料を採取するためのケースをロッドに設置し、貫入後にロッドを 90° 回転させることで試料を得る方式である。ロッドの打設と回転、引抜きのみで試験を終えるため、施工性が良い。また、試料を採取した深度が明瞭である。ただし、ケースを設置することにより貫入抵抗が増加し、貫入性能が悪くなることや、回転の可否が地盤の側圧に強く依存してしまうことが欠点である。

外付けスリーブ型を図-4.52 に示す。水平方向に展開可能なスリーブ設置枠をロッドに設置し、引抜き時に展開させることで試料をスリーブ内に採取する方式である。枠は 1m 毎に設置し、利点は、ロッドの打設と引抜きのみで試験の操作が簡便であることである。欠点としては、スリーブが摩擦により破けてしまうことや、引抜き抵抗が大きくなり試験装置が抑留することが懸念される点である。

棒打ち型を図-4.53 に示す。ロッドの側壁の切り欠きの回転によって試料を採取する。切り欠きの回転を抑制する支持棒を予めロッド内部に挿入しておき、ロッド貫入後に支持棒を引抜き、切り欠きを回転させる展開棒をロッド内部に挿入し、試験装置を引抜くというものである。利点は試料を採取する深度が明瞭であることである。欠点は、採取可能な試料が少ないこと、ロッド内部に棒を挿入するため、自記式ないし遠隔操作のロードセルでない場合、接続ケーブルの位置を考慮する必要がある点であること、他の二つと比べて実験操作が多くなり、施工性が悪くなる点である。

表-4.1. 使用する計測機器とサンプリング周波数

実験の種類	設置場所	計測項目	記号	単位	計測機器(メーカー, 機種, 測定容量)
共通	貫入装置	鉛直変位	d	mm	ワイヤ式変位計((株)共和電業, DTPA-A-2K, 2000mm)
	貫入装置	押し込み荷重	Q	kN	ロードセル((株)地盤試験所, 50kN)
S&CPT	プローブ	コーン貫入抵抗	Q_c	kN	圧力計((有)アイオーテック, FP110, 50MPa, 断面積 $A_p=156.1 \text{ mm}^2$)
	プローブ	三軸加速度	a_x, a_y, a_z	m/s^2	加速度計((有)アイオーテック, AMI603, $\pm 19.6 \text{ m/s}^2$)
S&PUT	プローブ	先端抵抗力	Q_p	kN	ロードセル(立川機械製作所, 100kN)

表-4.2. Geoprobe 6610DT の仕様

項目	容量
機械質量	2,277 kg
最大油圧	16.9 MPa
プローブシリンダーのストローク	1,676 mm
最大押し込み力	160 kN
引抜き力	214 kN
静的圧入時の貫入速度	$20 \pm 10 \text{ mm/s}$
1秒あたりの最大打撃回数	32

表-4.3. S&CPT のケース

Case	貫入方式	サンプリングチューブの長さ (m)	スリーブ	予定した最大貫入深さ $z_{p,max}$ (m)
SCPT-1	静的-20mm/s	1	無し	1
SCPT-2		2	有り	2
SCPT-3	打撃(3-10Hz)	1		1

表-4.4. S&PUT のケース

Case	貫入方式	センタライザー	スライダー	抵抗翼の貫入長 (mm)	予定した最大貫入深さ z _{p,max} (m)
SPUT-1	静的圧入(20mm/s)	有り	有り	10	2
SPUT-2※		無し			無し
SPUT-3	静的(20mm/s) →打撃(3-10Hz)				
SPUT-4	静的圧入(20mm/s)		30		

※0~0.8 m はオーガーで掘削し, GL -0.835 m から貫入開始

表-4.5. 実験結果の一覧

Case	プローブの 最大貫入深度 $z_{p,max}(m)$	ケーシングの 最大貫入深度 $z_{c,max}(m)$	試料の質 量 $m(kg)$	試料採取 率 $R_h(\%)$	$Q_{p,raw}$ の初期値 と終了値(μs)	抵抗翼の 展開
SCPT-1	1.38	1.07	8.08	91.1	-	-
SCPT-2	2.43	2.12	11.36	64.7	-	-
SCPT-3	1.45	1.14	11.82	125.1	-	-
SPUT-1	2.46	1.49	2.36	19.1	-18.25/-117.3	両方
SPUT-2	1.47	1.04	No Data	No Data	-8.438/-50.69	片方のみ
SPUT-3	10.21	3.08	7.61	29.8	-1.500/-107.3	片方のみ
SPUT-4	10.14	-	-	-	-9.375/-87.69	両方

※砂の単位体積重量は 18 kN/m^3 とした

表-4.6. SCPT-1 の作業人数と所要時間

項目	作業範囲(開始/終了)	作業人数	作業時刻	所要時間 (分)
試験装置の組立て	実験装置の配置/原型機の建て込み	3	9:10~9:57	47
原型機の貫入	地上計測開始/貫入終了	3	9:57~9:58	1
原型機の引抜き	原型機の引抜き/原型機の揚収	3	10:02~10:03	1
試験装置の分解	原型機の倒置/試料の回収	3	10:05~10:25	20
合計		3		69

表-4.7 SCPT-2 の作業人数と所要時間

項目	作業範囲(開始/終了)	作業人数	作業時刻	所要時間 (分)
試験装置の組立て	実験装置の配置/原型機の建て込み	3	13:10~13:30	20
原型機の貫入	地上計測開始/貫入終了	3	13:38~13:43	5
原型機の引抜き	原型機の引抜き開始/原型機の揚収	3	13:45~13:46 13:51~13:52	2
試験装置の分解	原型機の倒置/試料の回収	3	13:52~14:10	8
合計		3		35

表-4.8 SCPT-3 の作業人数と所要時間

項目	作業範囲(開始/終了)	作業人数	作業時刻	所要時間 (分)
試験装置の組立て	実験装置の配置/原型機の建て込み	3	14:15~14:30	15
原型機の貫入	地上計測開始/貫入終了	3	14:33~14:41	8
原型機の引抜き	原型機の引抜き開始/原型機の揚収	3	14:42~14:43	1
試験装置の分解	原型機の倒置/試料の回収	3	14:44~14:58	14
合計		3		38

表-4.9 SPUT -1 の作業人数と所要時間

項目	作業範囲(開始/終了)	作業人数	作業時刻	所要時間 (分)
試験装置の組立て	実験装置の配置/原型機の建て込み	3	8:30~9:20	50
ロッドの貫入	地上計測開始/ロッドの貫入終了	3	9:20~9:24	4
ケーシングの打設	ケーシングの建て込み/打設終了	3	9:24~9:34	10
引抜き	ケーシング・ロッドの引抜き/試料の回収	3	9:38~9:42 9:46~9:51	9
試験装置の分解	原型機の揚収/原型機の分解	3	9:54~10:00	6
合計		3		79

表-4.10. SPUT -2 の作業人数と所要時間

項目	作業範囲(開始/終了)	作業人数	作業時刻	所要時間 (分)
試験装置の組立て	実験装置の配置/原型機の建て込み	3	13:00~13:32	32
ロッドの貫入	地上計測開始/ロッドの貫入終了	3	13:39~13:50	11
ケーシングの打設	ケーシングの建て込み/打設終了	3	14:03~14:14	11
引抜き	ケーシング・ロッドの引抜き/試料の回収	3	14:18~14:22 14:22~14:44 15:12~15:19	33
試験装置の分解	原型機の揚収/原型機の分解	3	15:21~15:25	6
合計		3		78

表-4.11. SPUT -3 の作業人数と所要時間

項目	作業範囲(開始/終了)	作業人数	作業時刻	所要時間 (分)
試験装置の組立て	実験装置の配置/原型機の建込み	3	8:12~8:52	40
ロッドの貫入	地上計測開始/ロッドの貫入終了	3	8:53~9:11	18
引抜き	ケーシング・ロッドの引抜き/試料の回収	3	9:12~9:27	15
試験装置の分解	原型機の揚収/原型機の分解	3	9:14~9:20	6
合計		3		79

表-4.12. SPUT -4 の作業人数と所要時間

項目	作業範囲(開始/終了)	作業人数	作業時刻	所要時間(分)
試験装置の組立て	実験装置の配置/原型機の建て込み	3	10:05~10:39	34
ロッドの貫入	地上計測開始/ロッドの貫入終了	3	10:39~10:41	2
ケーシングの打設	ケーシングの建て込み/打設終了	3	10:57~10:58	1
引抜き	ケーシング・ロッドの引抜き/試料の回収	3	11:07~11:08 11:12~11:13 11:20~11:25	7
試験装置の分解	原型機の倒置/原型機の分解	3	11:13~11:19	6
合計		3		50

表-4.13 提案するサンプリング方法の利点と欠点

名称	サンプリング方法	利点	欠点
ケース 回転型	ロッドに固定されたケースを回転	<ul style="list-style-type: none"> ・施工性の良さ（1回の打設と引抜き） ・深度分解能の良さ 	<ul style="list-style-type: none"> ・ケースにより貫入抵抗が増加 ・回転の可否が地盤の側圧に強く依存
外付け スリーブ型	引抜き時にスリーブ設置棒を展開	<ul style="list-style-type: none"> ・施工性の良さ（1回の打設と引抜き） 	<ul style="list-style-type: none"> ・スリーブの脆弱さ ・引抜抵抗が大きく，抑留する懸念
棒打ち型	貫入後に支持棒を抜き展開棒を挿入して切り欠きを回転	<ul style="list-style-type: none"> ・深度分解能の良さ 	<ul style="list-style-type: none"> ・採取可能な試料の少なさ ・ロードセルのケーブルとの位置関係 ・施工性（支持棒の引抜きと展開棒の打設）

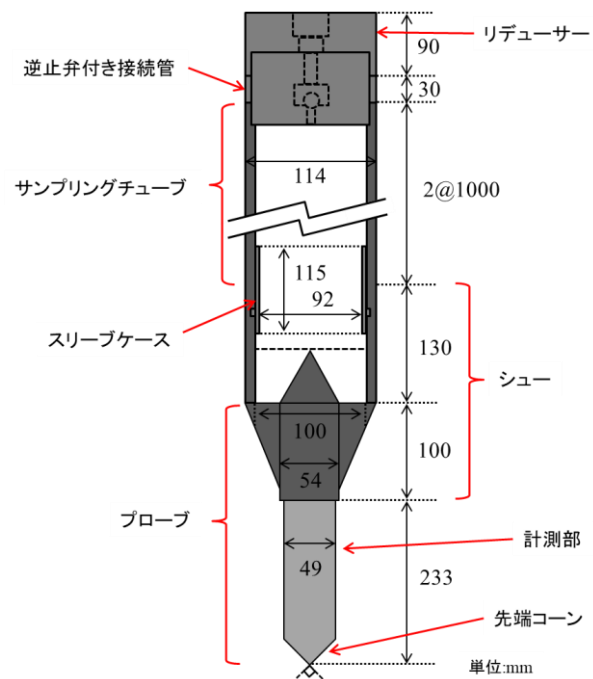


図-4.1. S&CPT の原型機

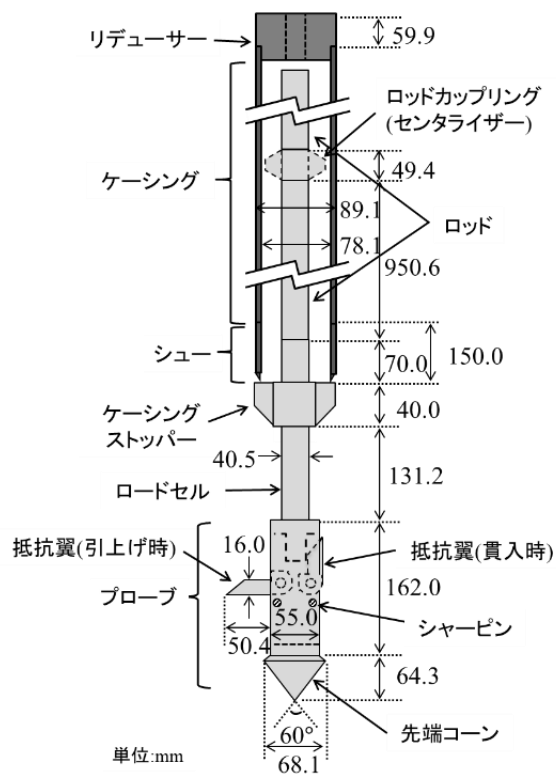
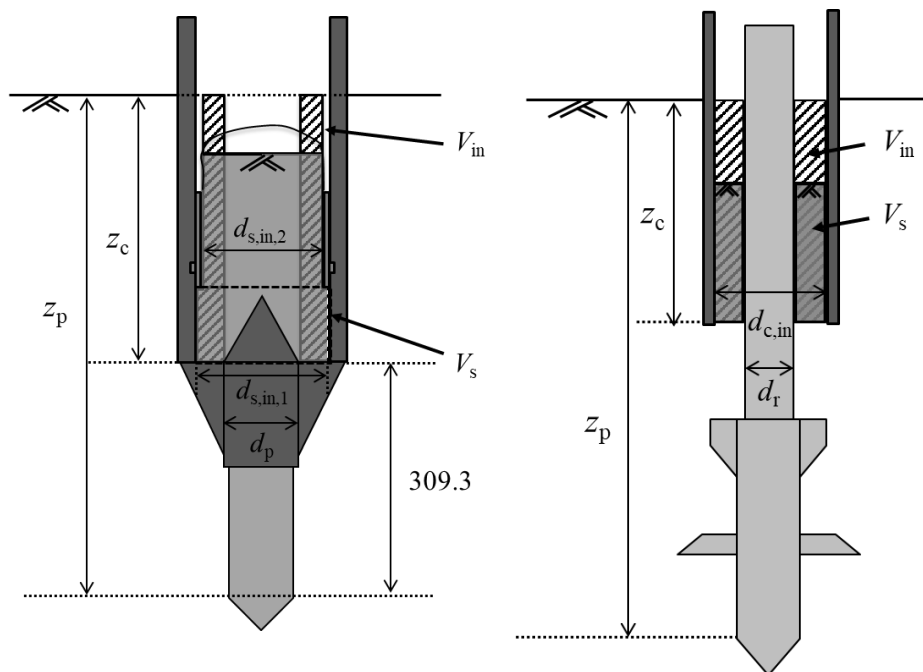


図-4.2. S&PUT の原型機
(貫入長 30 mm の場合)



- z_p :プローブの貫入深さ
 z_c :ケーシングの貫入深さ
 V_s :実際に採取された試料の体積
 V_{in} :理想的に採取される試料の体積

図-4.3. z_p, z_c, V_s, V_{in} の定義



図-4.4. 実験の実施場所

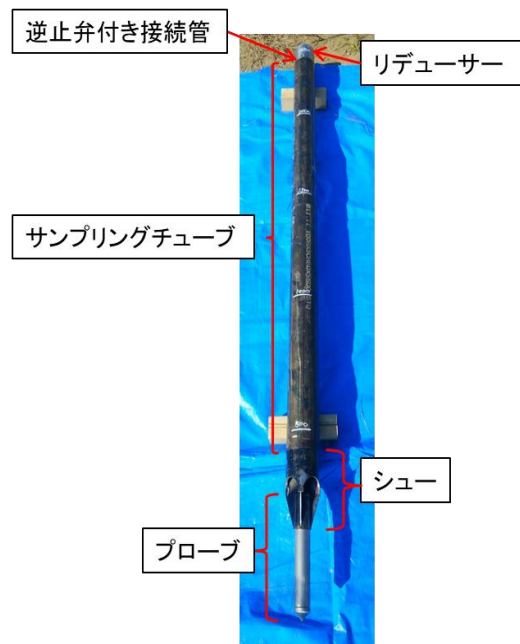


図-4.5. S&CPT の原型機

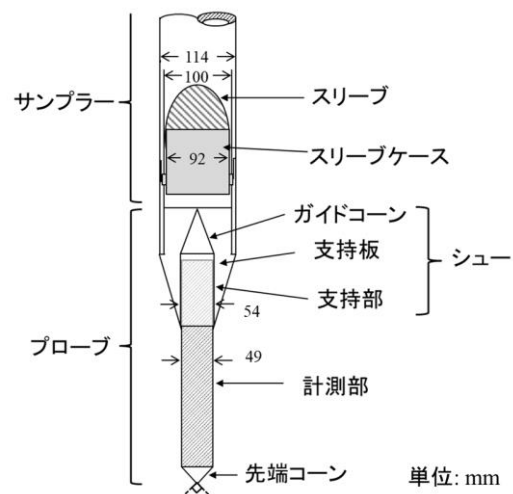


図-4.6. S&CPT のプローブ断面



図-4.7. S&CPT のプローブ計測部の電子基板



図-4.8. S&PUT のロッド、ケーシング、リデューサー、シュー、ロッドカップリング

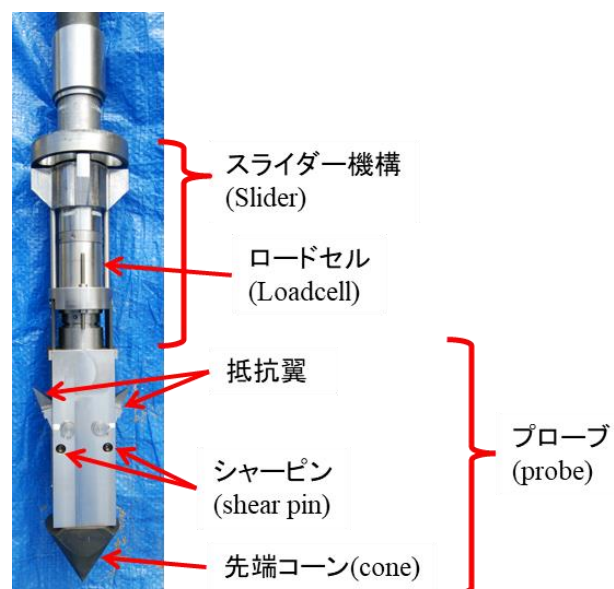


図-4.9. S&PUT の原型機の先端部

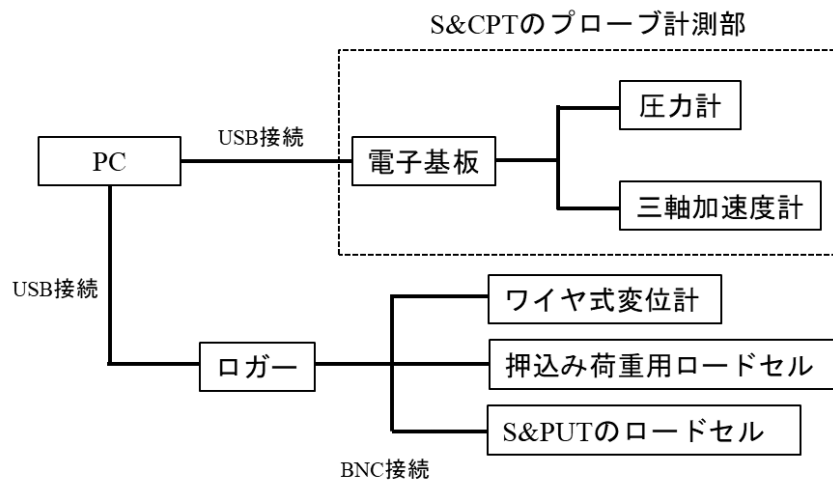


図-4.10. 計測システムの構成

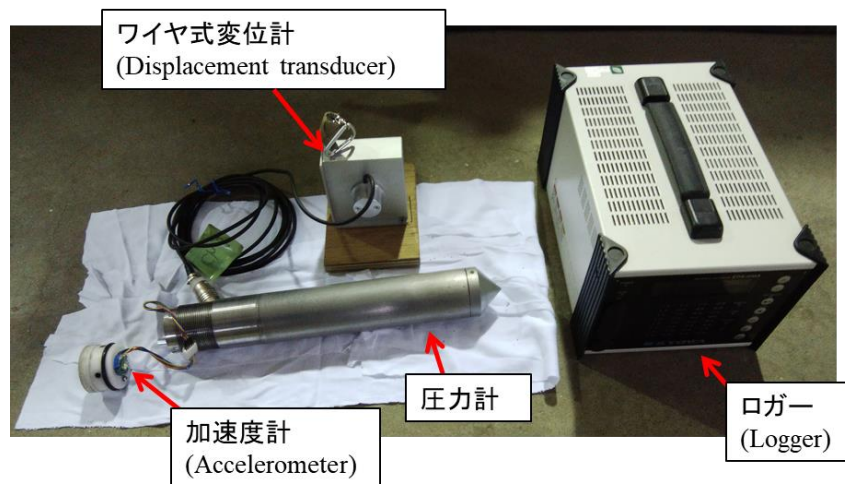


図-4.11. 圧力計，加速度計，ワイヤ式変位計，データロガー



図-4.12. ボーリングマシン(Geoprobe 6610DT)

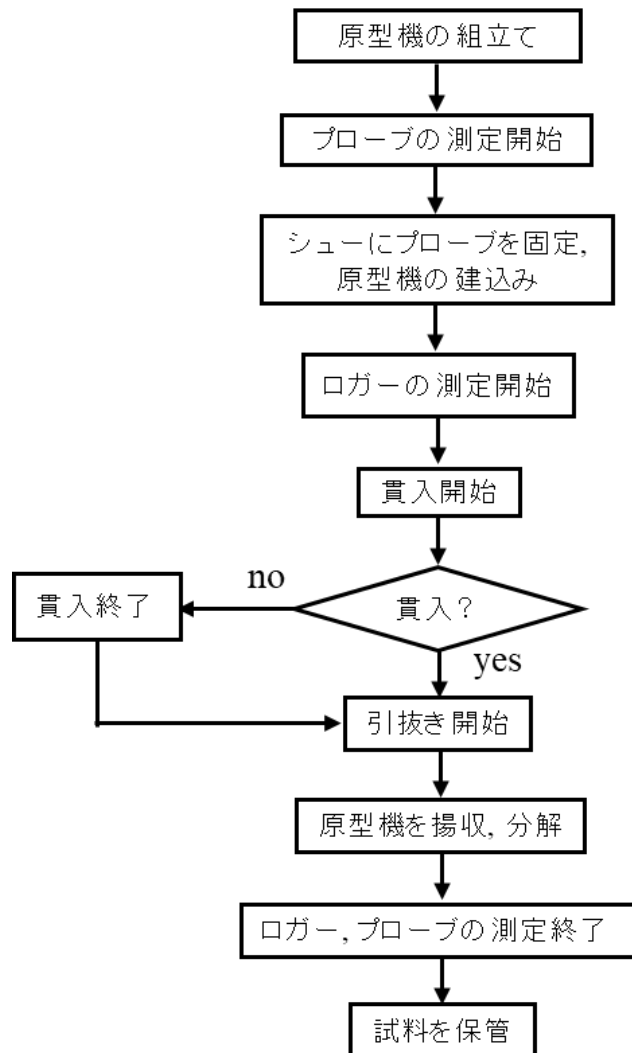


図-4.13. S&CPT の試験手順

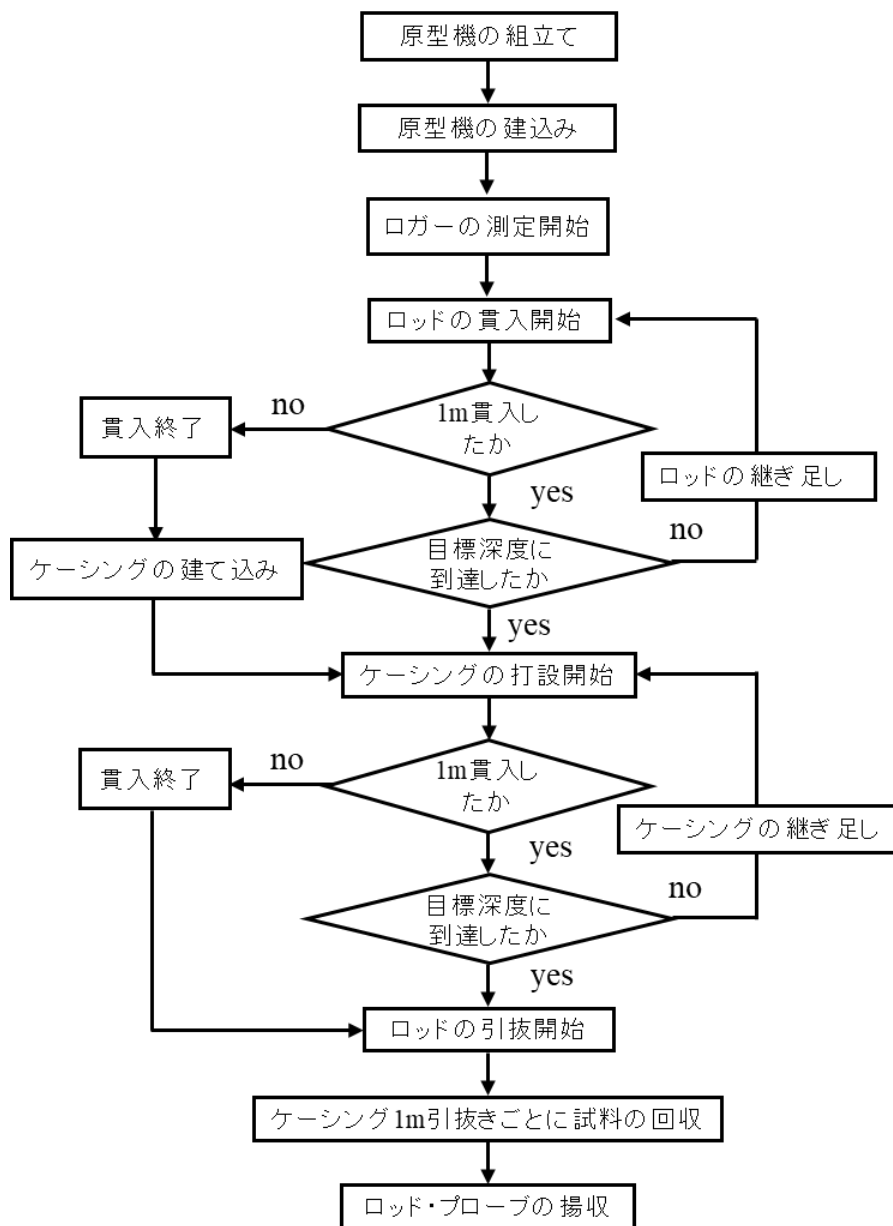


図-4.14. S&PUT の試験手順

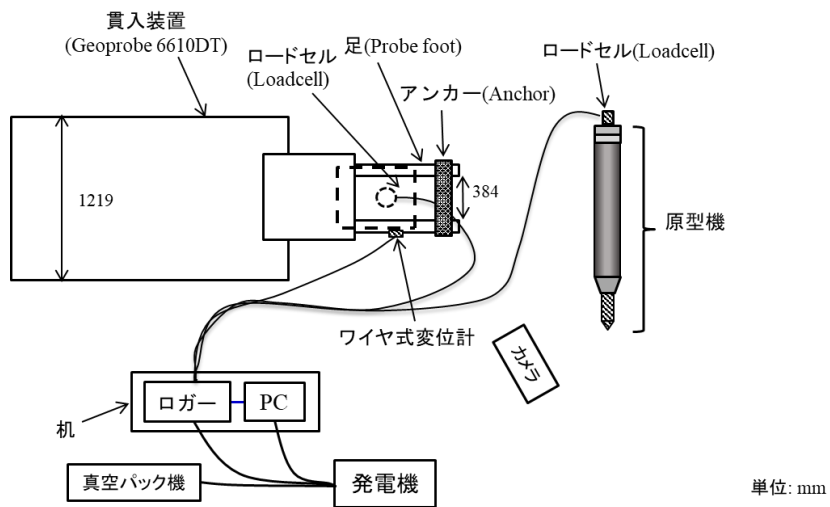


図-4.15. S&CPT の実験の平面配置

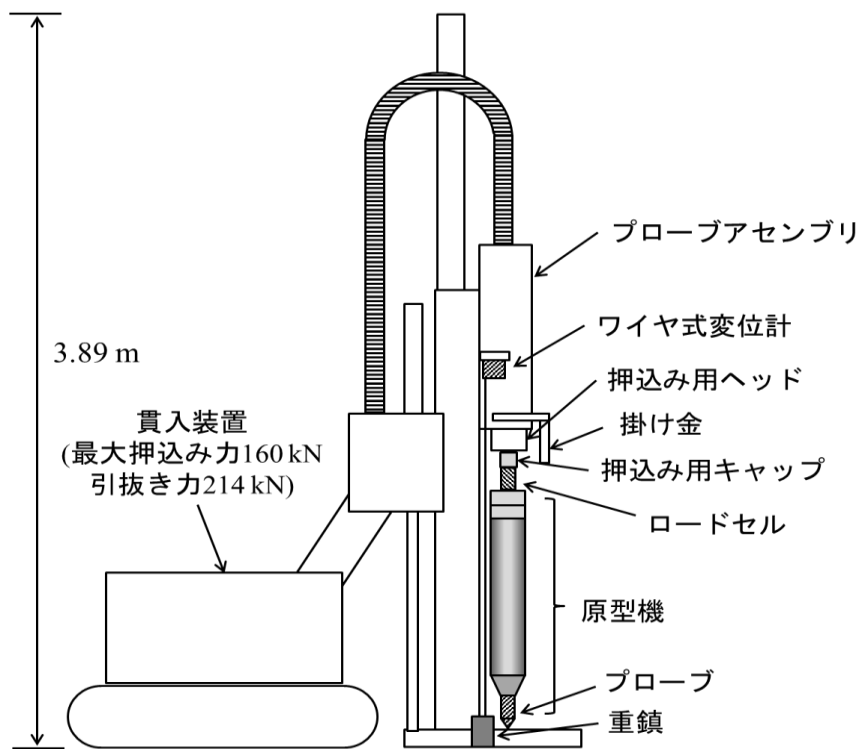


図-4.16. S&CPT の実験の原型機建込み時の側面配置

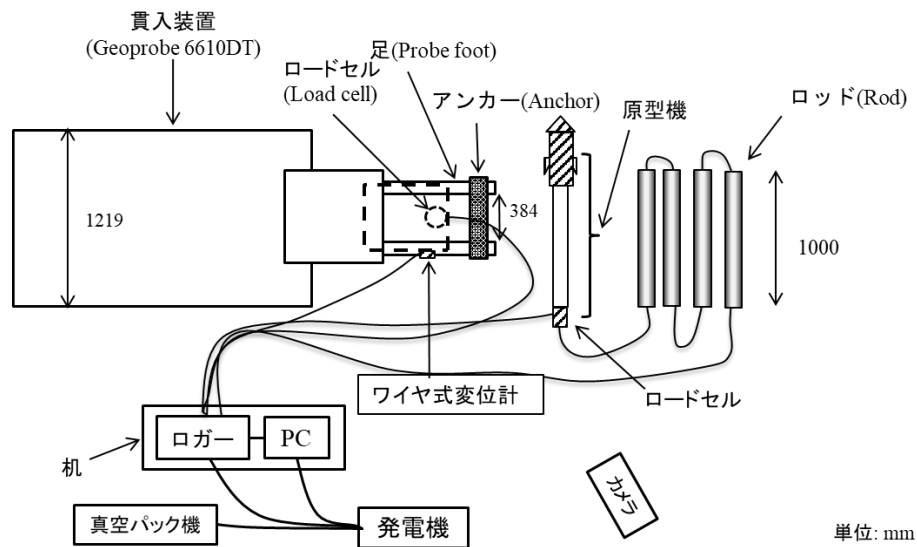


図-4.17. S&PUT の実験の平面配置(ロッド 5m 貫入の場合)

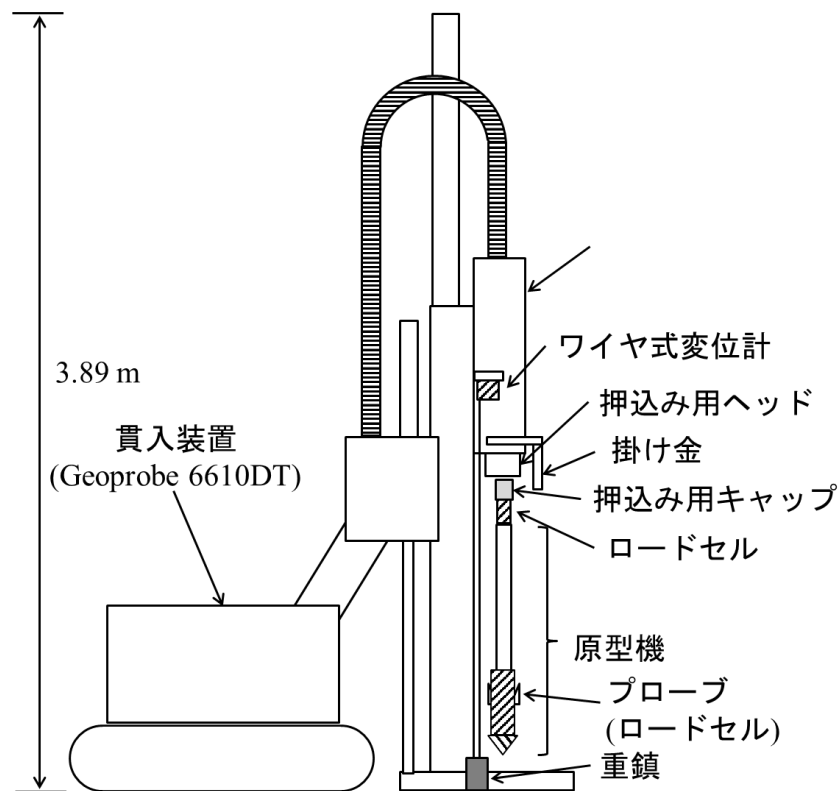


図-4.18. S&PUT の実験の原型機建込み時の側面配置

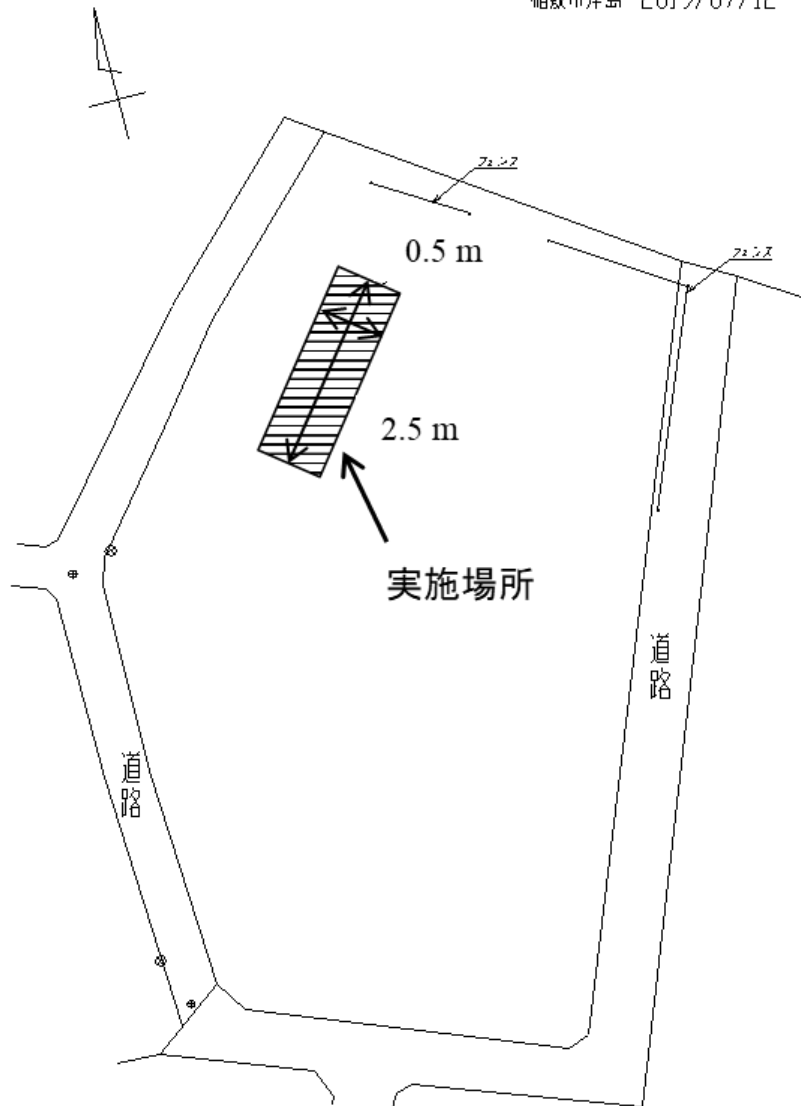


図-4.19. 実験の詳細な実施場所

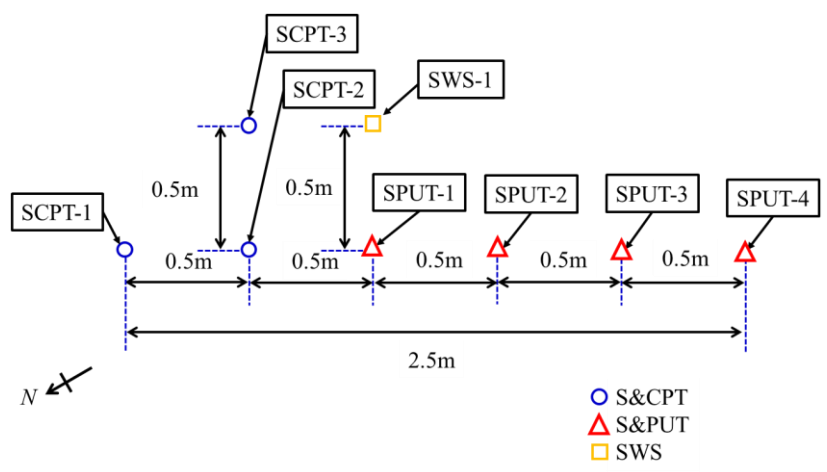


図-4.20. 実験の位置

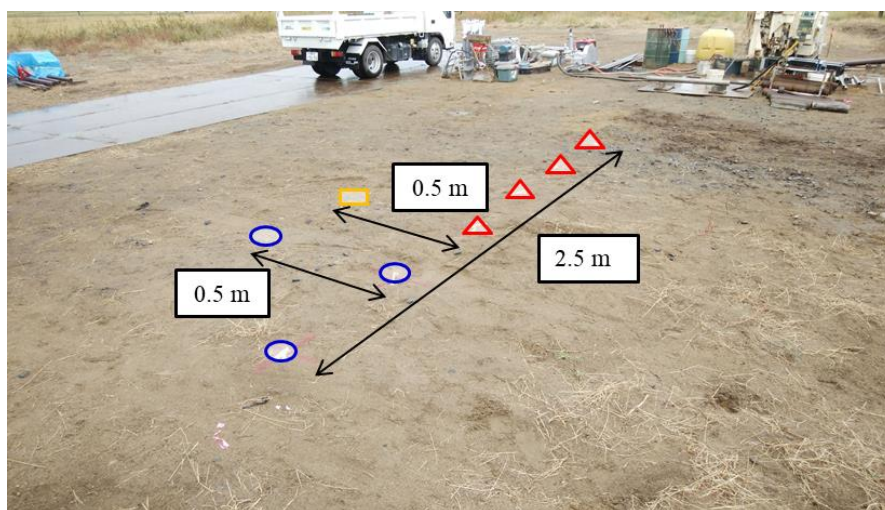


図-4.21. 実験の実施地点

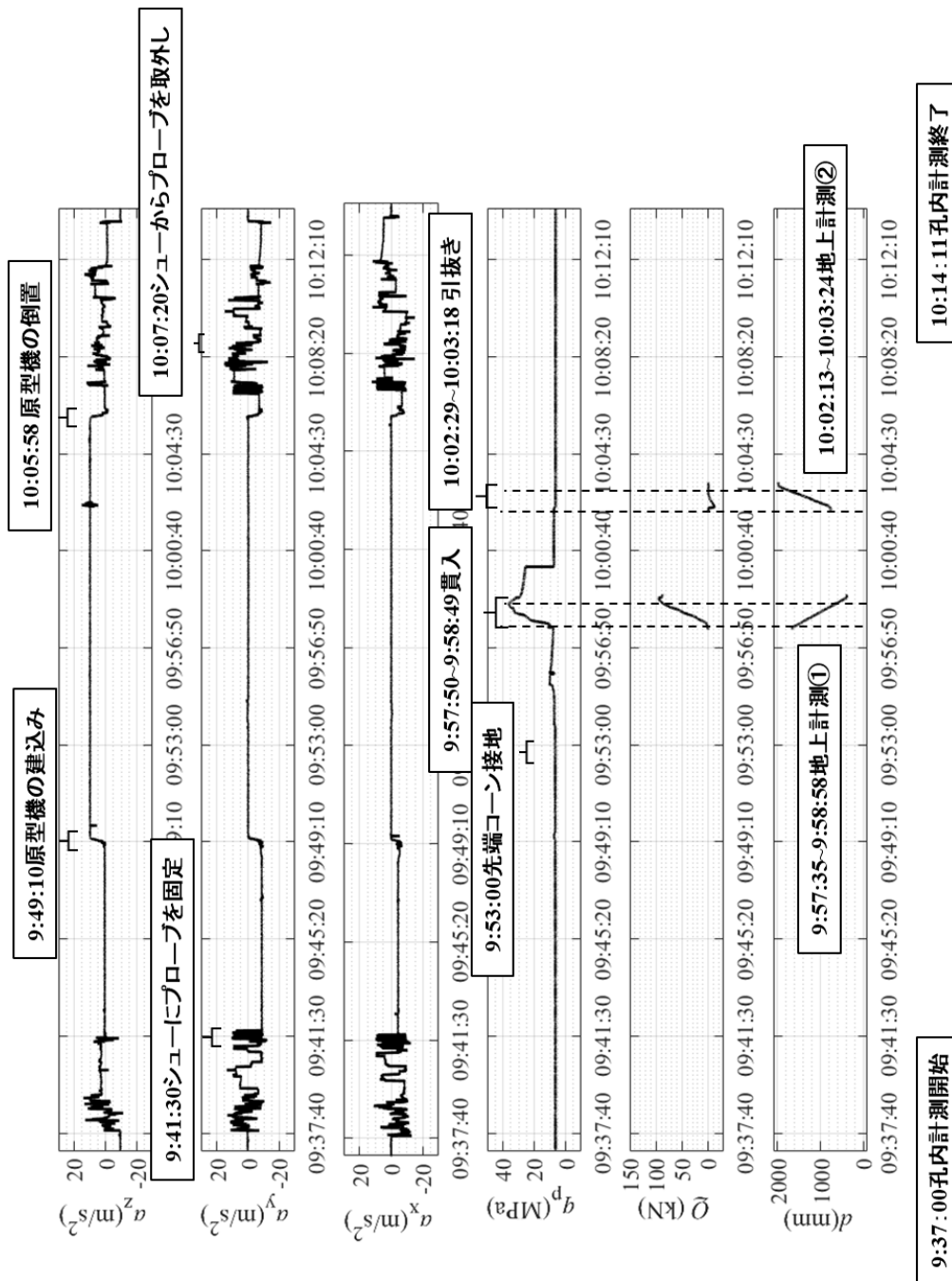


図-4.22. SCPT-1 の時系列分布

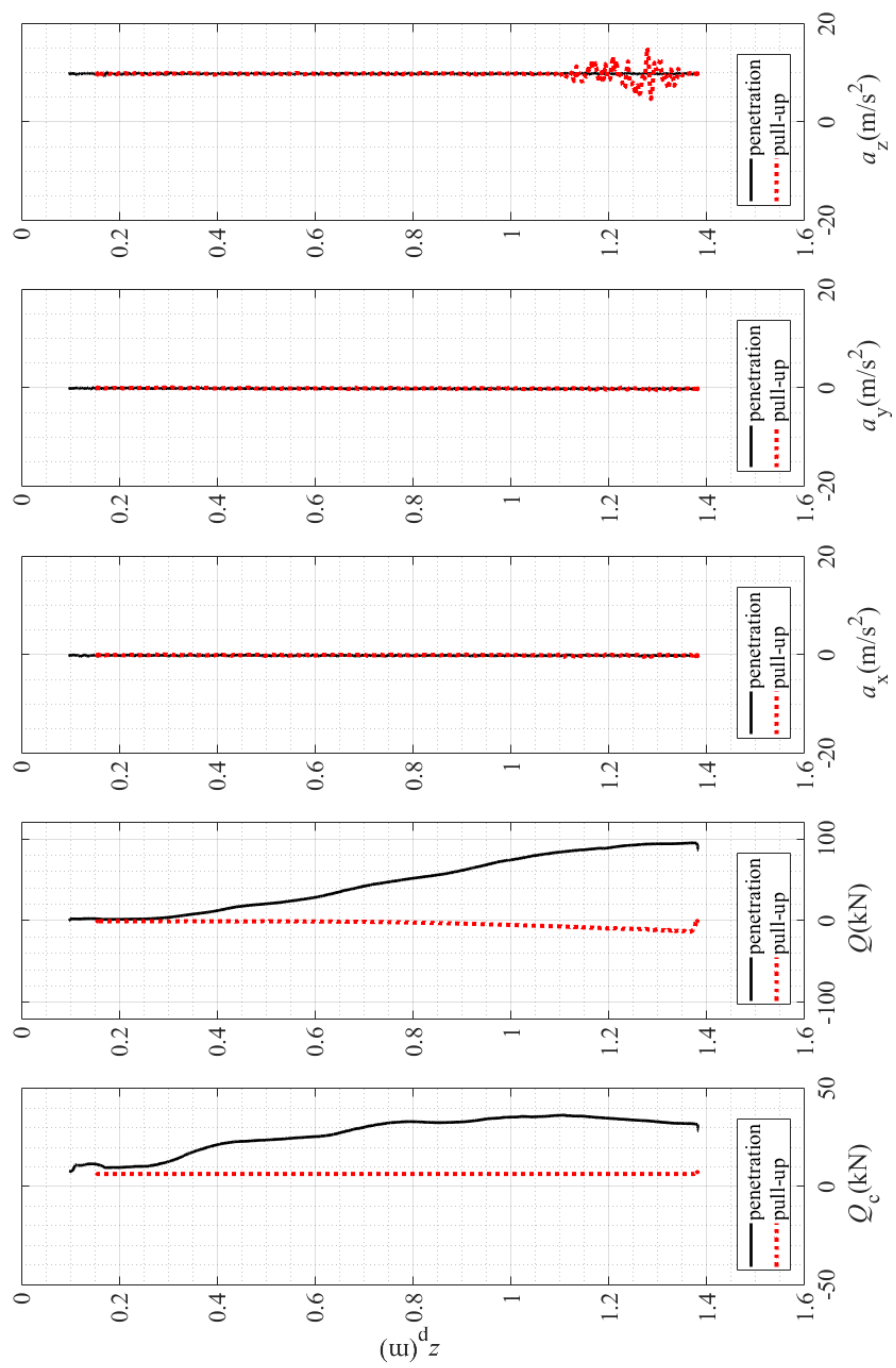


図-4.23. SCPT-1 の深度分布



図-4.24. SCPT-1 で採取した試料



図-4.25. SCPT-2 で採取した試料



図-4.26. SCPT-3 で採取した試料

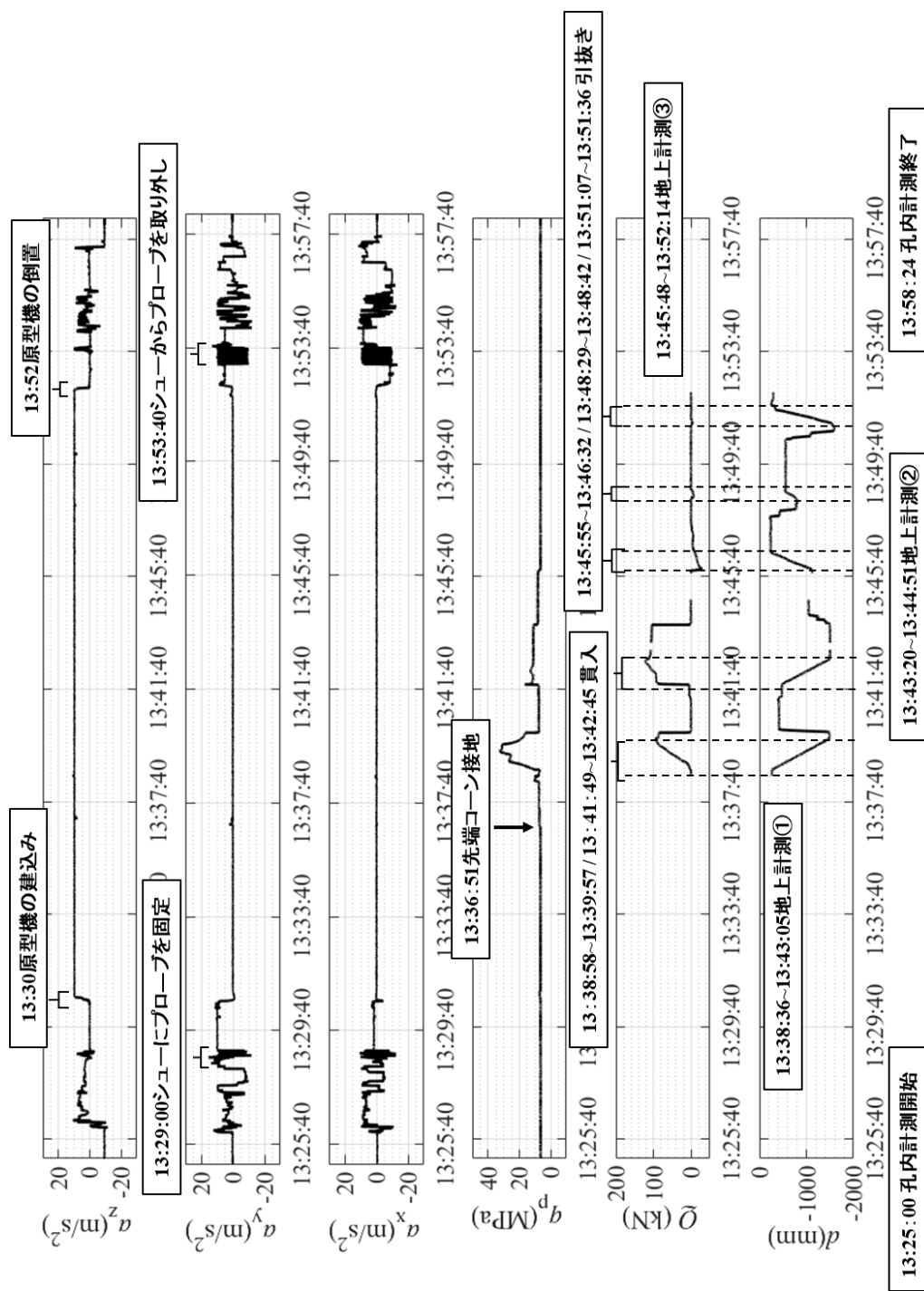


図-4.27. SCPT-2 の時系列分布

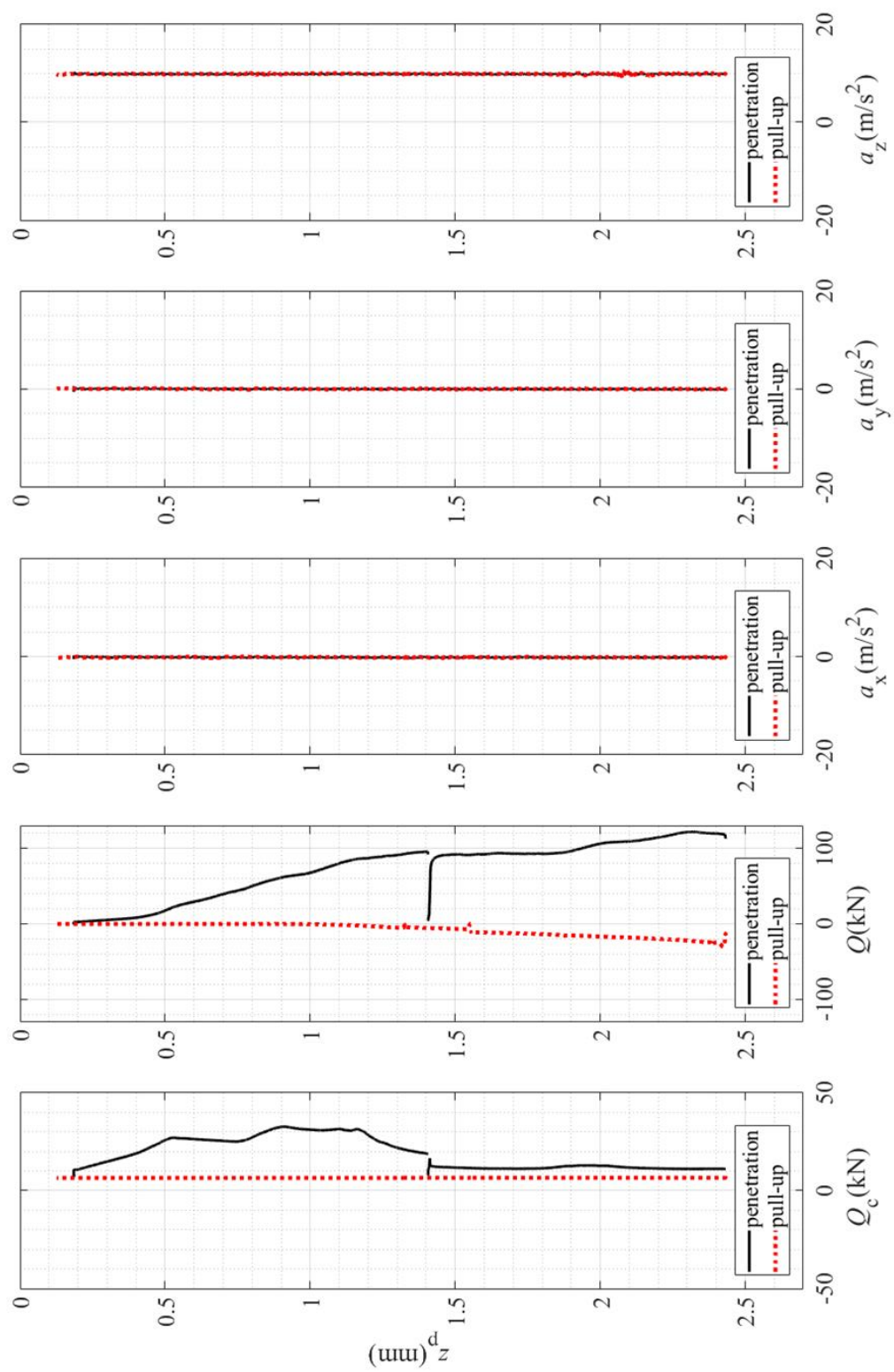


図-4.28. SCPT-2 の深度分布

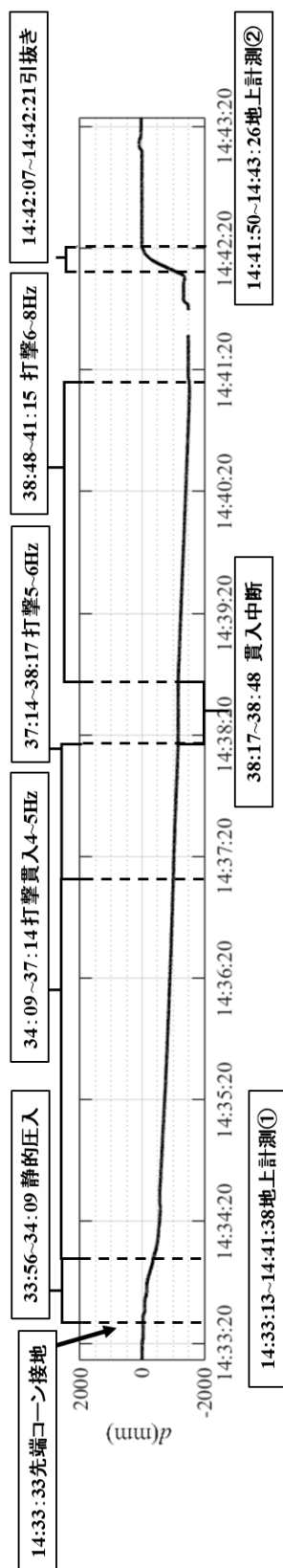


図-4.29. SCPT-3 の時系列分布



図-4.30. SCPT-3 の揚収後の先端コーン

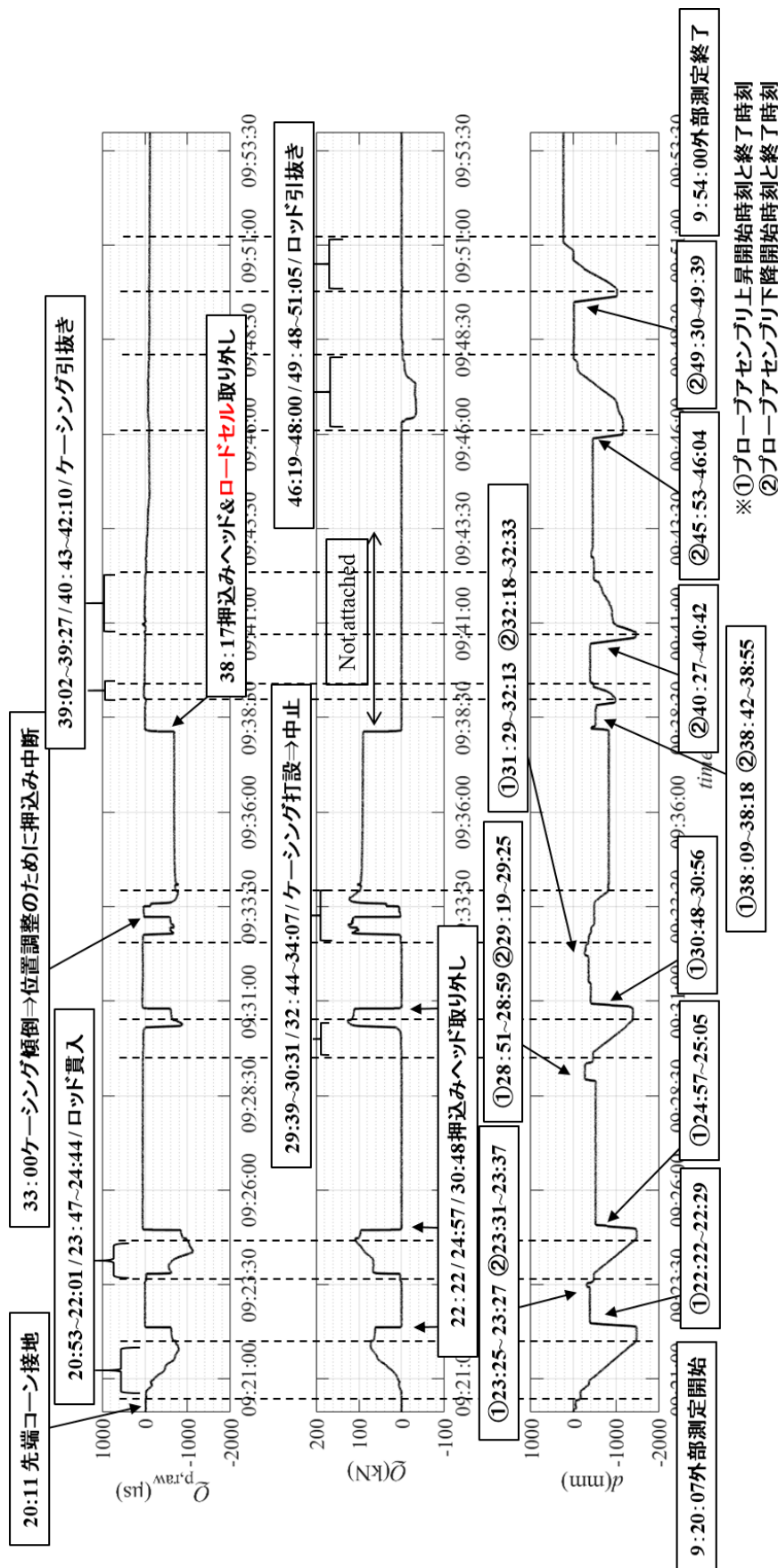


図-4.31. SPUT-1 の時系列分布

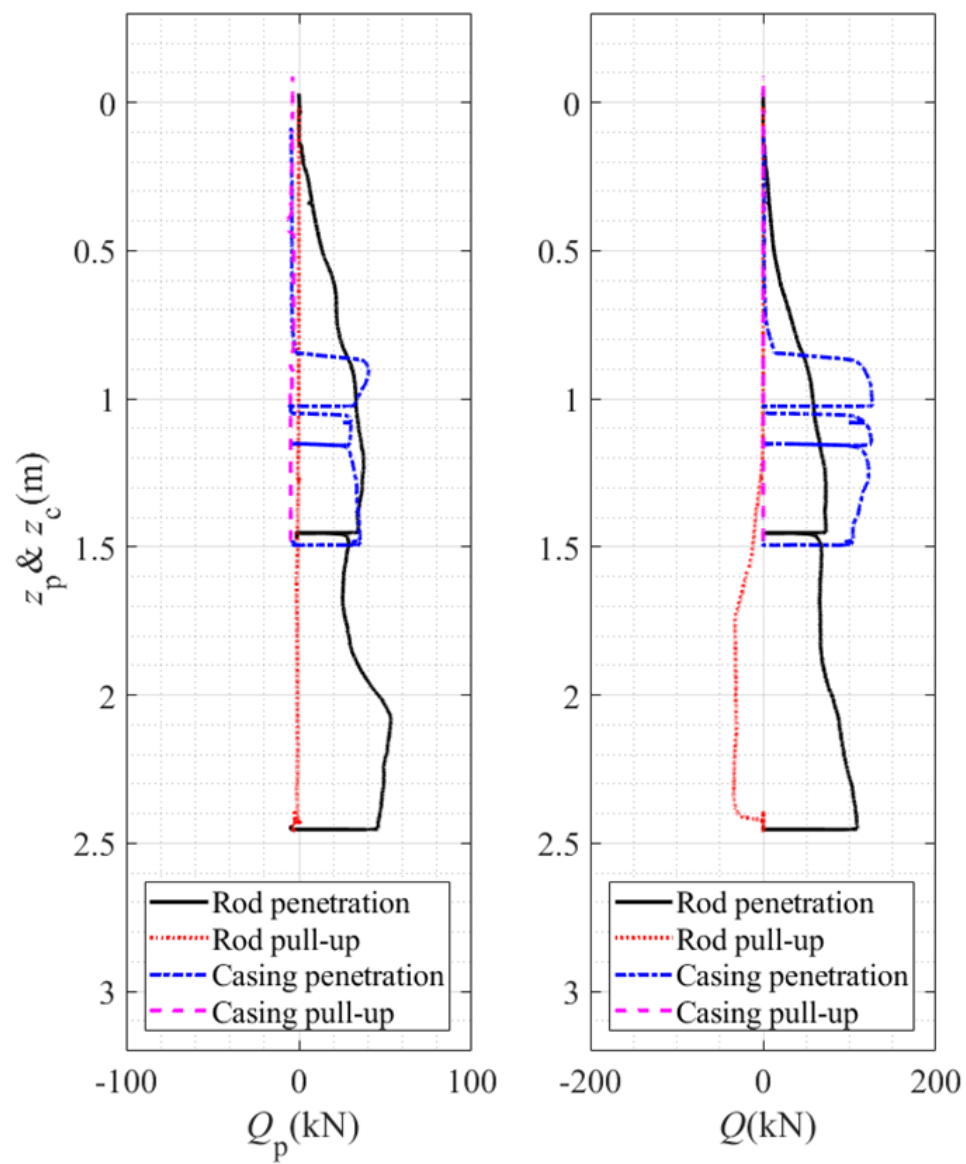


図-4.32. SPUT-1 の深度分布



図-4.33. SPUT-1 で採取した試料



図-4.34. SPUT-1 の揚収後の抵抗翼



図-4.35. SPUT-1 の揚収後の変形したシュー

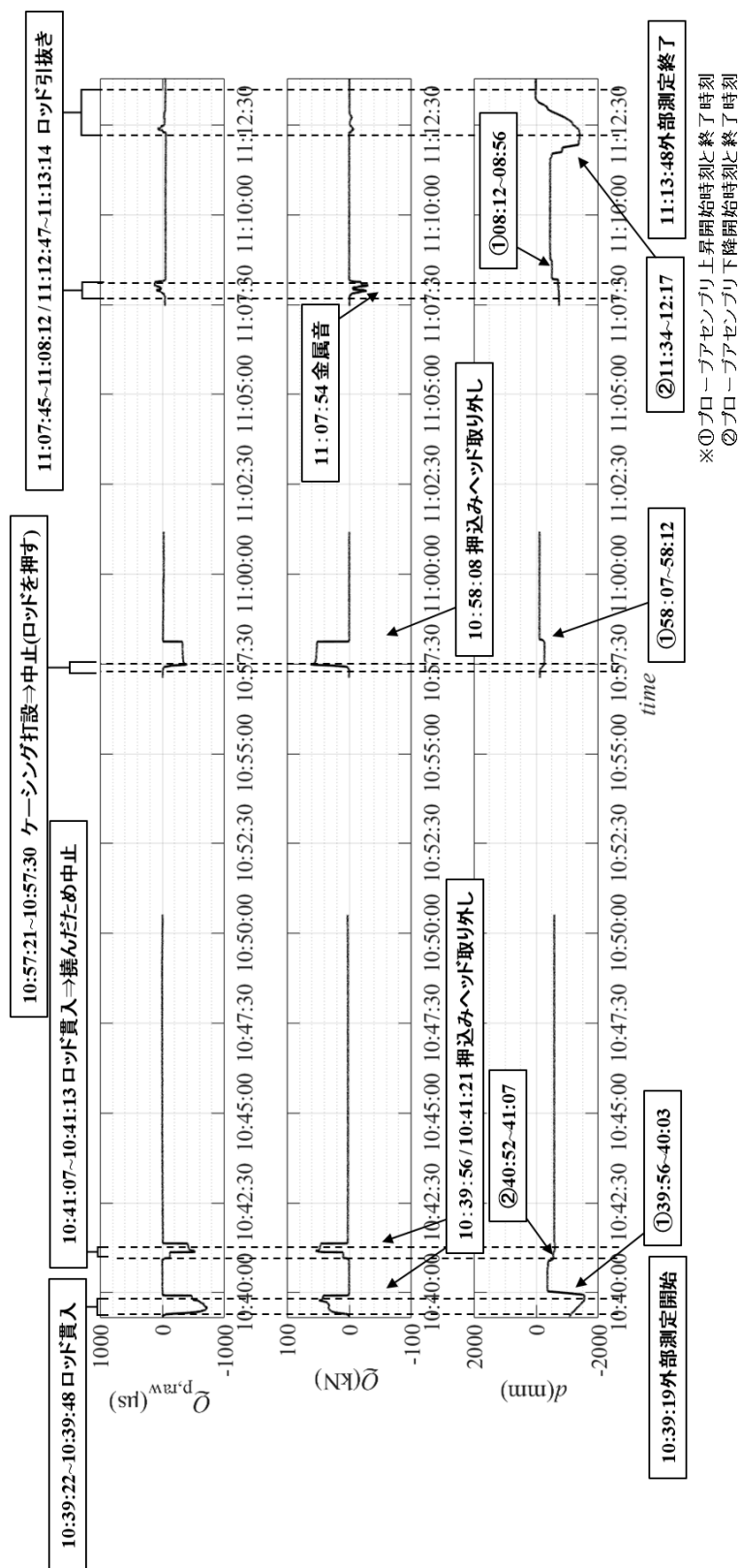


図-4.36. SPUT-2 の時系列分布

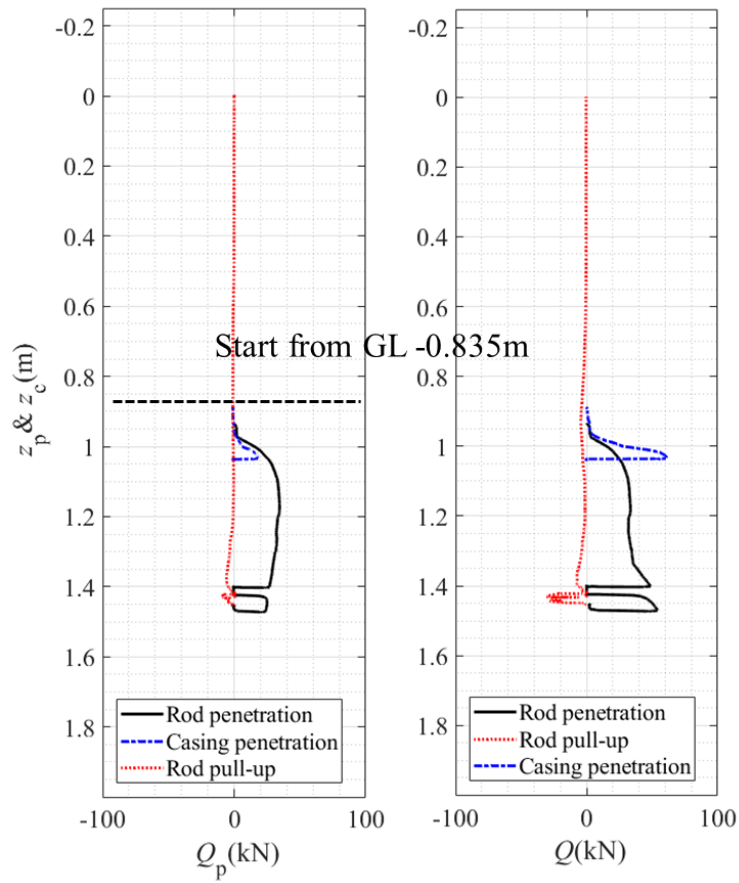


図-4.37. SPUT-2 の深度分布



図-4.38. SPUT-2 の揚収後のプローブ

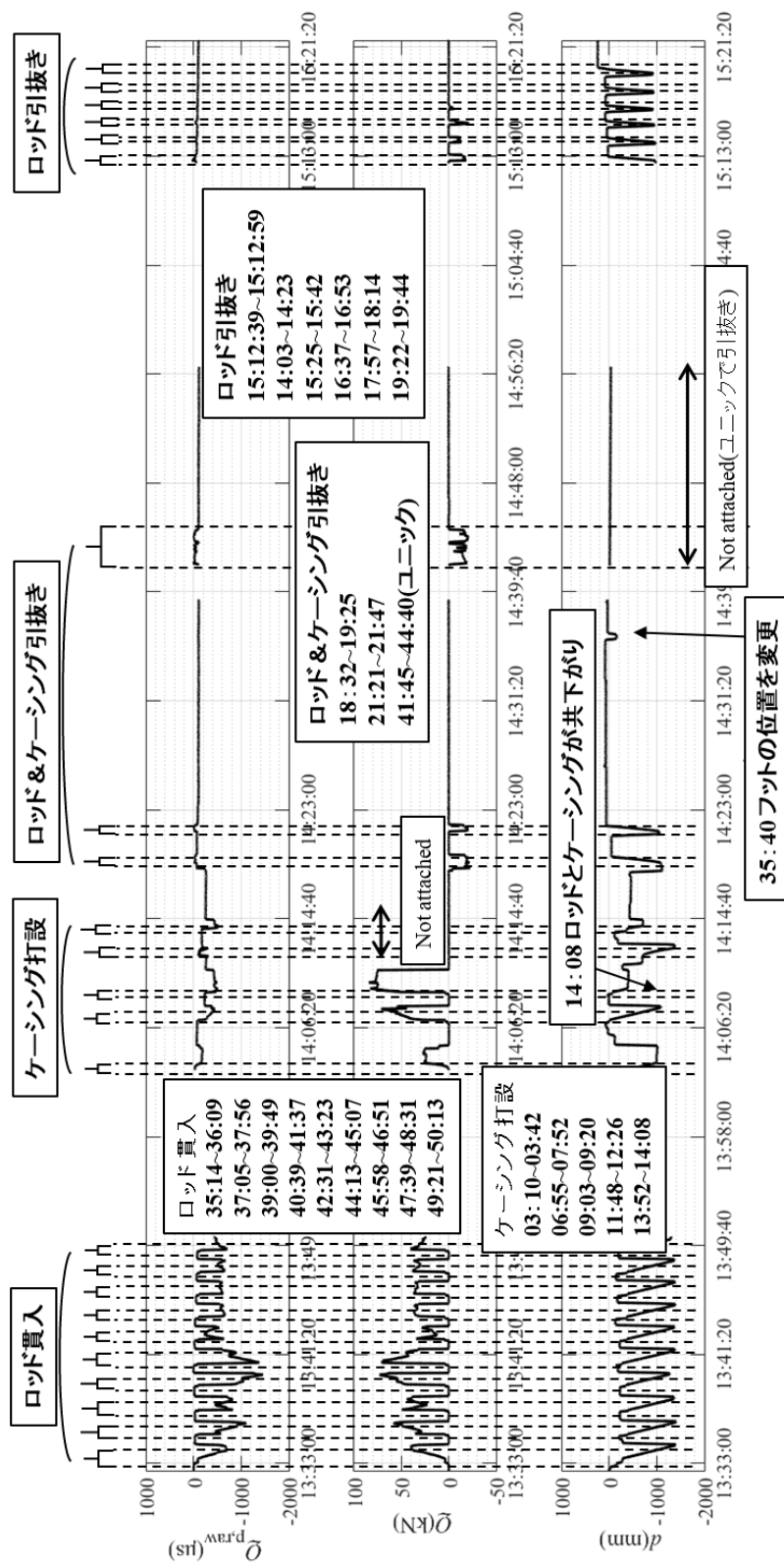


図-4.39. SPUT-3 の時系列分布

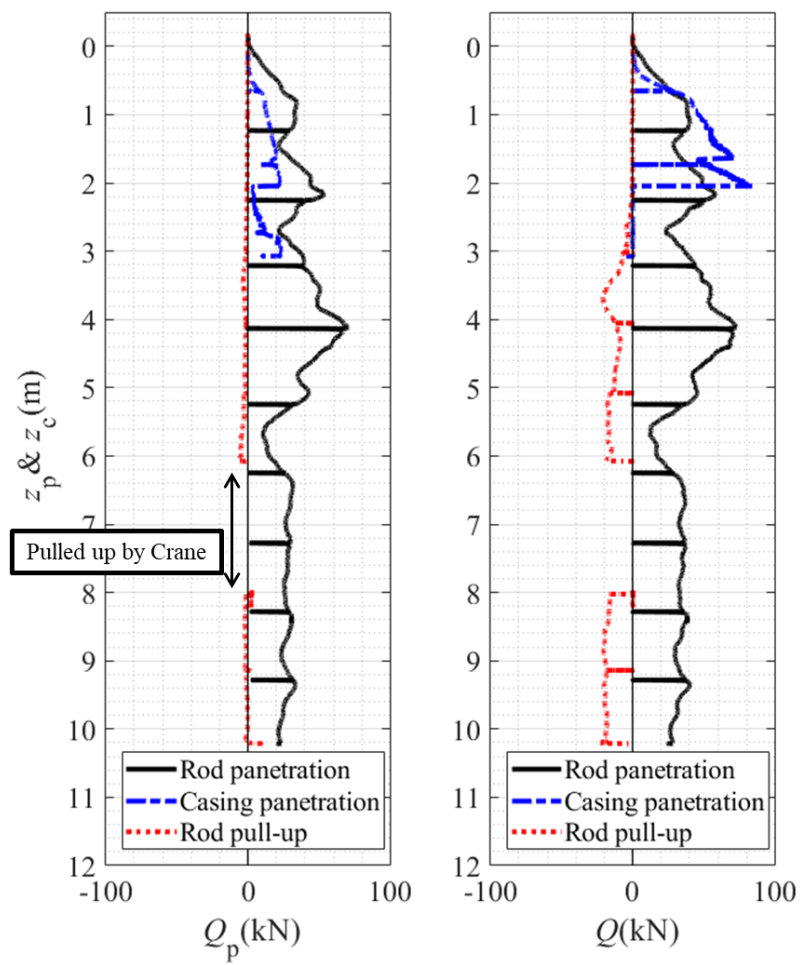


図-4.40. SPUT-3 の深度分布



図-4.41. SPUT-3 で採取した試料



図-4.42. SPUT-3 の揚収後のプローブ

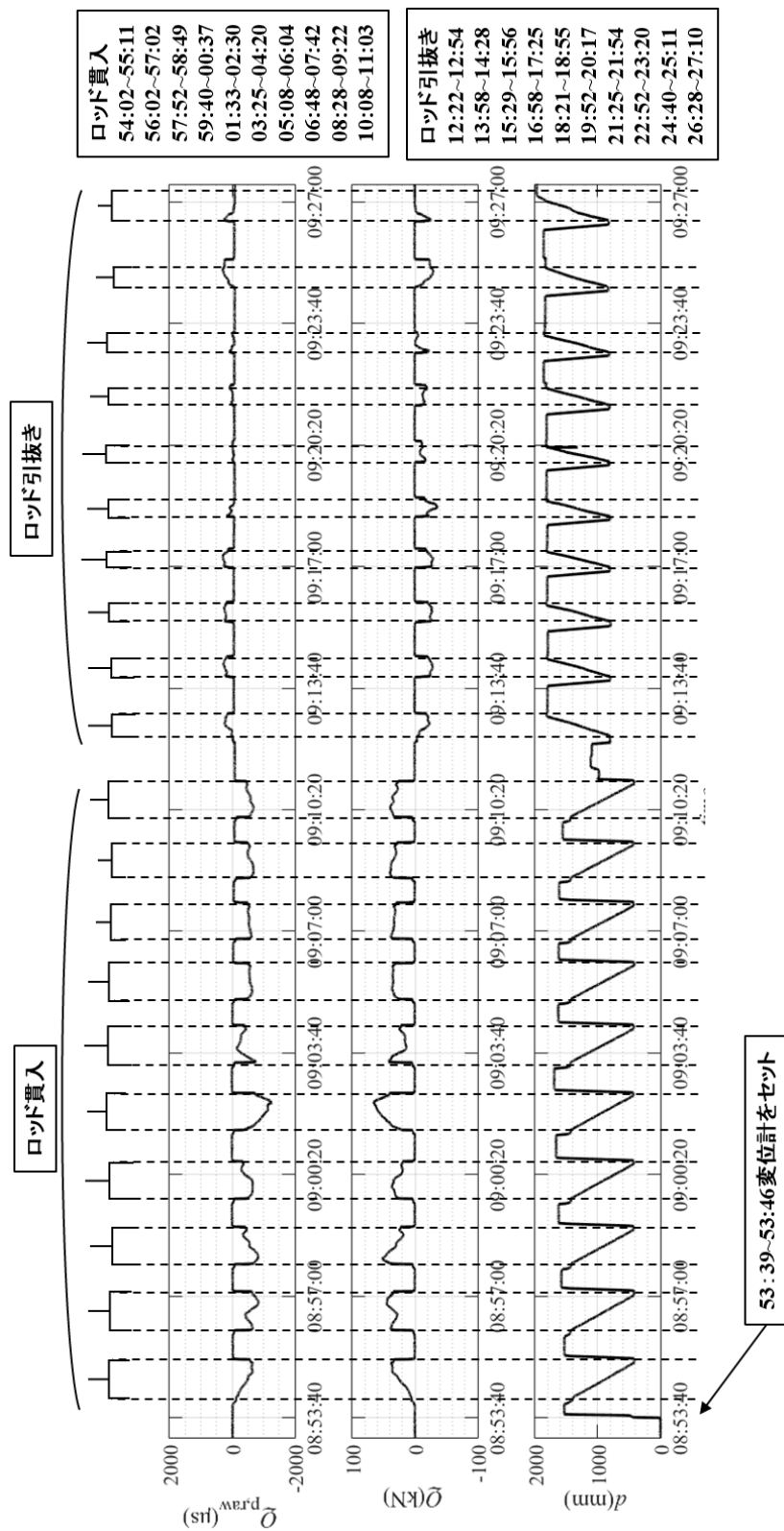


図-4.43. SPUT-4 の時系列分布

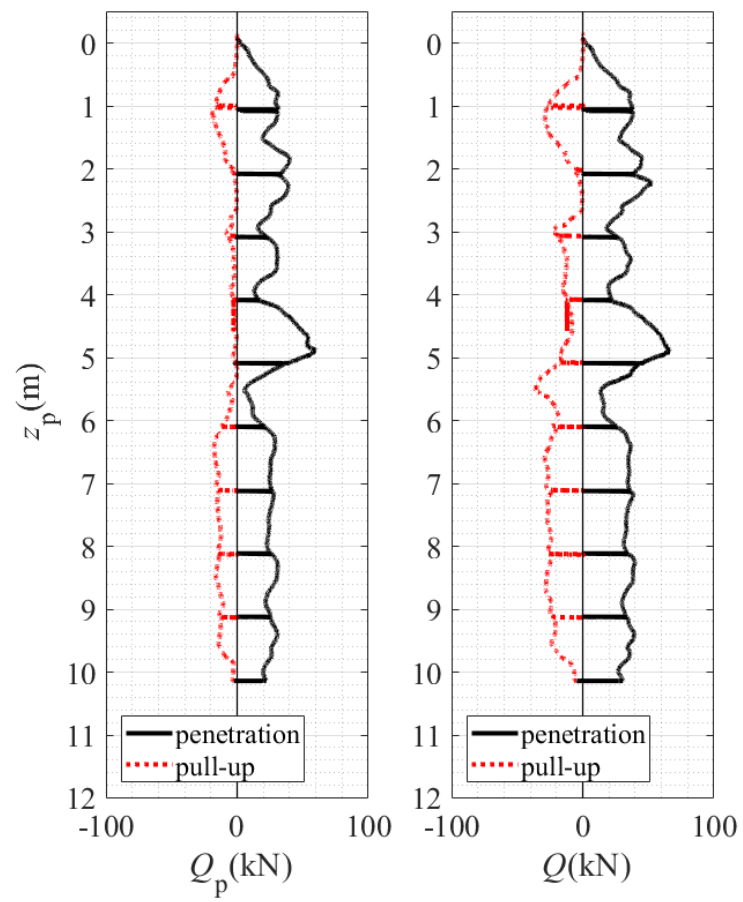


図-4.44. SPUT-4 の深度分布



図-4.45. SPUT-4 の揚収後のプローブ

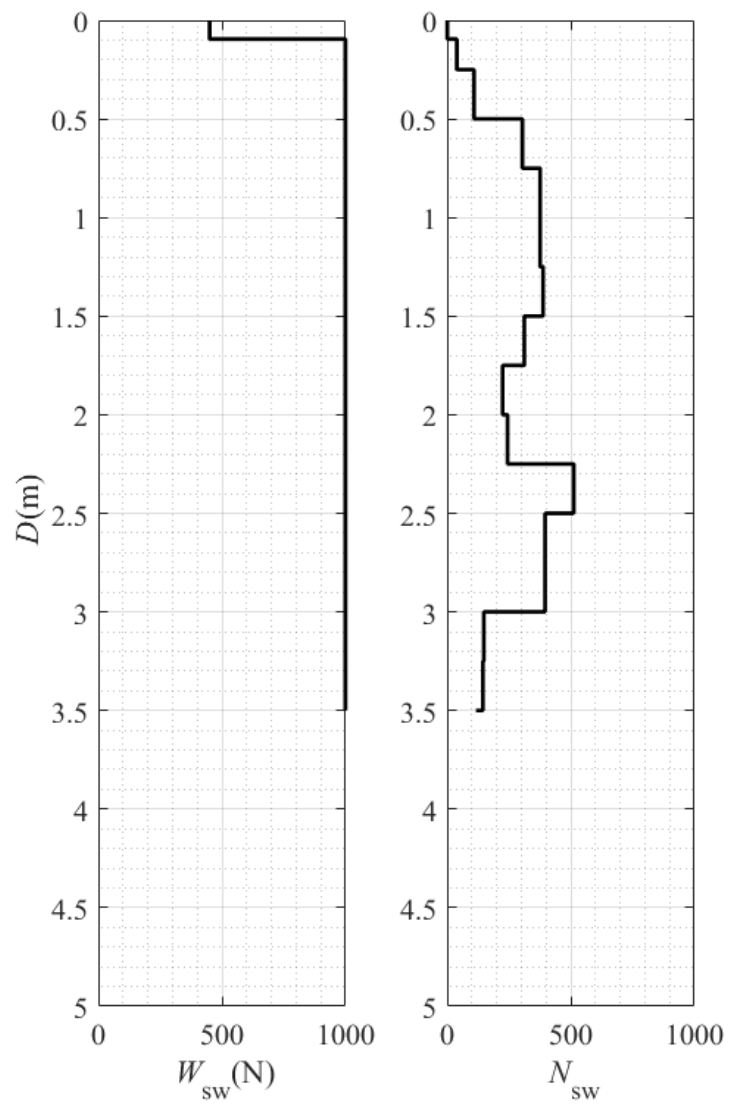


図-4.46. SWS-1 の荷重と半回転当たり貫入量の深度

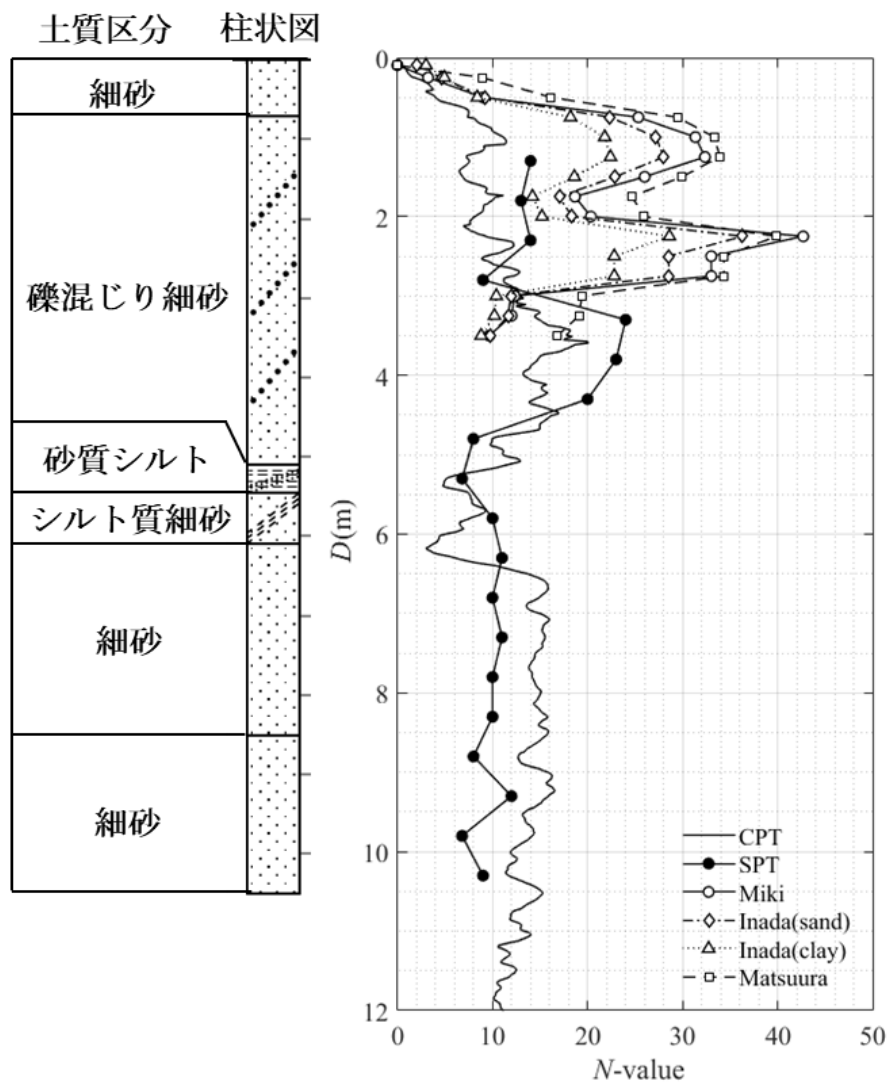


図-4.47. SPT の土質柱状図と N 値, CPT 及び SWS の換算 N 値の深度分布

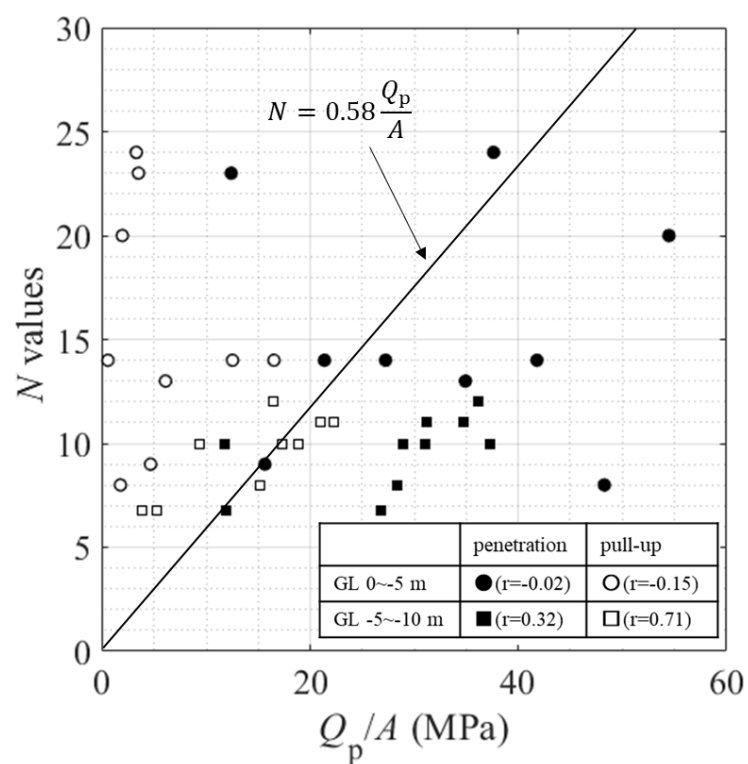


図-4.48. N 値と先端抵抗 Q_p/A の関係

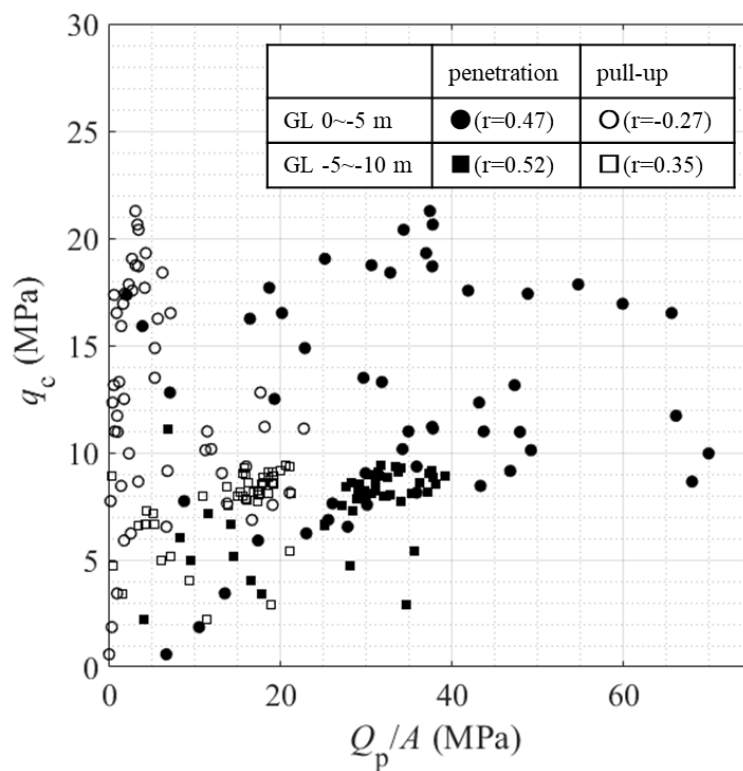


図-4.49. コーン貫入抵抗 q_c の Q_p/A との関係

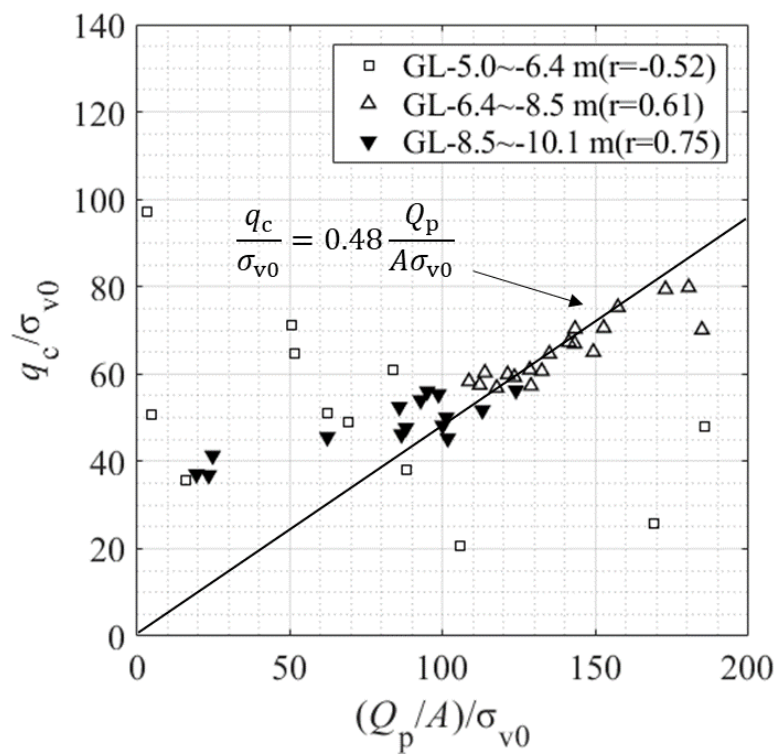


図-4.50. 無次元化したコーン貫入抵抗と引抜き時の先端抵抗力の関係

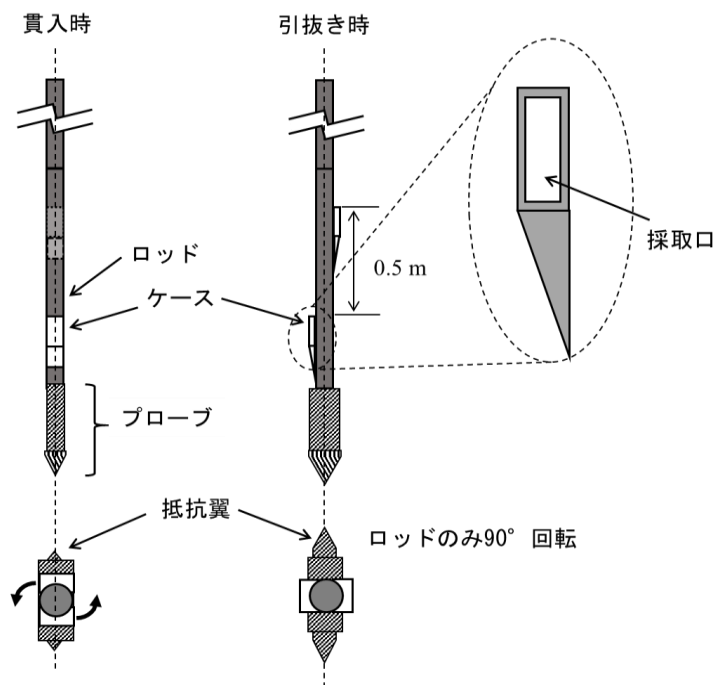


図-4.51 ケース回転型

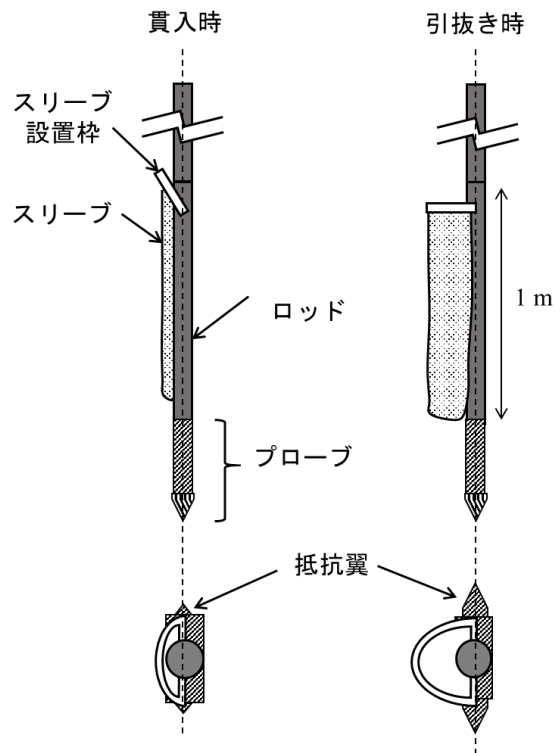


図-4.52 外付けスリーブ型

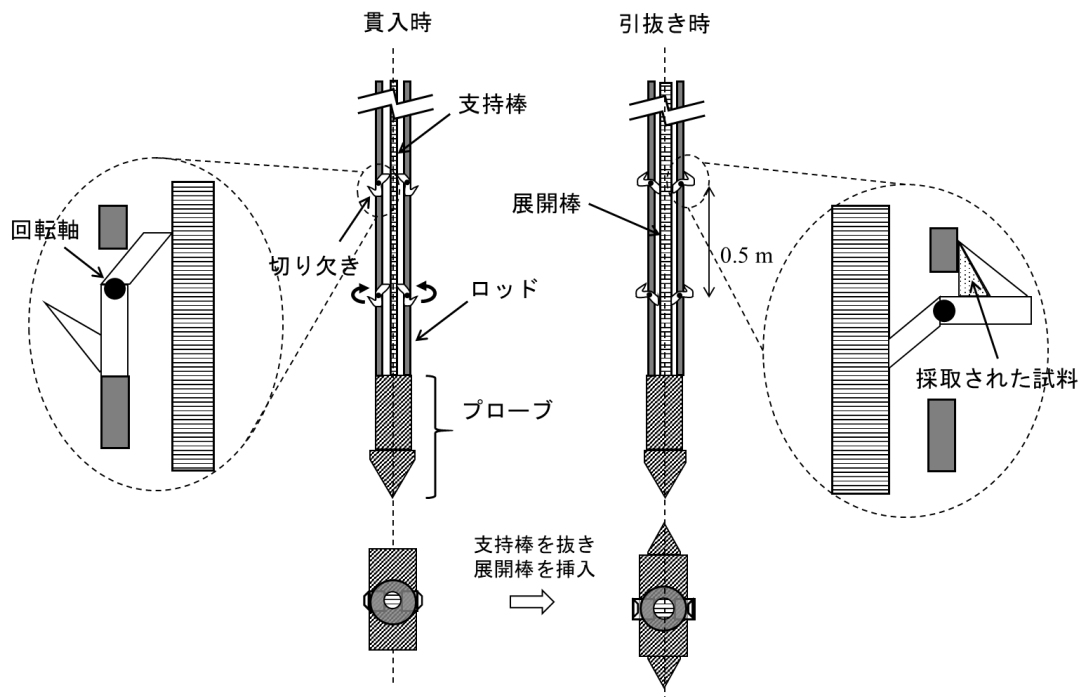


図-4.53 棒打ち型

第5章 まとめ

5.1 結論

(1) S&CPT に関する結論

貫入性能については、最大押込み力 160 kN のボーリングマシンを用いてプローブの径 49 mm, サンプラーの外径 114 mm の原型機を貫入させる場合、3~10Hz 程度の打撃を用いることで N 値 9~14 の礫混じり細砂に対しては深さ 1 m まで貫入できる。静的圧入の場合は、少なくとも 2 m まで貫入が可能であるが、閉塞が生じ、押込み荷重が 100 kN を超過するため、より硬質な地盤に、大深度でも適用するためには、規模の大きな貫入機が必要となる。

スリット孔は、孔の上面に土圧が作用し、貫入抵抗が増大することから、貫入性能を低下させるため不適である。

サウンディング性能については、サンプラーの先端で閉塞すると、貫入抵抗が増大し、コーン貫入抵抗は小さくなるため、サウンディングには利用できない。打撃を用いると先端コーンが破損する。また、飽和砂に対して振動を用いると、貫入抵抗は貫入深さによらずゼロとなる。

試料の採取性能については、スリーブがなければシューとスリーブケースで閉塞が生じにくいですが、乱された試料の取り出しが困難で層序が判別できない。スリーブがあればシューとスリーブケース内で閉塞がしやすくなるが、連続試料が採取可能である。閉断面のサンプラーは不適で、スリットを設けた場合、貫入性が低下するため、大深度での試験の実施が難しくなると思われた。

(2) S&PUT に関する結論

N 値が 4~25 の地盤に対して、ロッドは 20 mm/s の静的圧入によって 10 m の貫入と引抜きを行なうことができる。ケーシングは静的圧入で 2 m 程度、打撃(10~15Hz)を用いても 3 m 程度しか貫入させることができず、その際の押込み荷重は約 100 kN であった。

孔壁への貫入長が 30 mm であれば抵抗翼は両方が展開し、細砂からなる原地盤に対しては CPT の q_c と相関のあるサウンディングが、シルトや細砂からなる原地盤に対しては N 値と相関のあるサウンディングが可能である。

礫混じり砂からなる盛土では試料採取率は 30% に至らず、容易に管内閉塞を引き起こすため、閉断面のサンプラーは連続的な試料採取に適さない。

S&PUT は SPT よりも施工性が良い試験である。

5.2 残された課題

S&CPT と S&PUT の双方が抱える課題は、容易に管内閉塞を引き起こすことで、サンプラーの打ち込みができず、試料採取が困難となることである。よって、閉塞しにくいサンプリング機構が必要である。

参考文献

- a)地盤工学会編：地盤調査の方法と解説, pp.279-316, 2013.
- b)日本作業船協会：自己昇降式作業台船（引用日：2020年3月20日）
<http://www.s-jwa.or.jp/workvessels/set21.html>, 2020.
- c)地盤工学会編：地盤調査の方法と解説, pp.366~403, 2013.
- d)基礎地盤コンサルタンツ(株)：海底着座型調査機器を用いた簡易海洋地盤調査（引用日：2020年3月9日）
- e)エクセン(株)：軽便壁打型仕様（引用日：2018年9月3日）
https://www.exen.co.jp/construction/const_work_vibrator/E-KC/, 2018.
- f)フュージョンテクノロジー(株)：L-DEVO 製品ラインナップ（引用日：2018年9月3日）
<https://www.l-devo.com/lineup>, 2018.
- g)北日本産業株式会社：東北珪砂データ（引用日 2020年3月9日）
<http://www.catvy.ne.jp/~ktsangyo/data1.htm>
- h)バイブロハンマ工学技術研究会編：バイブロハンマ設計施工便覧, pp.105~109, 2015.
- i) Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, 1942.
- j)公益社団法人日本道路協会編：道路橋示方書・同解説 1・4 共通編・下部構造編, 2012.
- k)三木 五三郎：赤土台地における各種サウンディングの比較実験とその実用性の検討, 土と基礎特集号, No.1, pp.14~23, 1959
- l)稲田倍穂：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について, 土と基礎, vol.8, No.1, pp.13~17, 1960.
- m)日本建築学会中国史部基礎地盤委員会：まさ土地盤の圧縮性状に関する研究, 1983.

付録

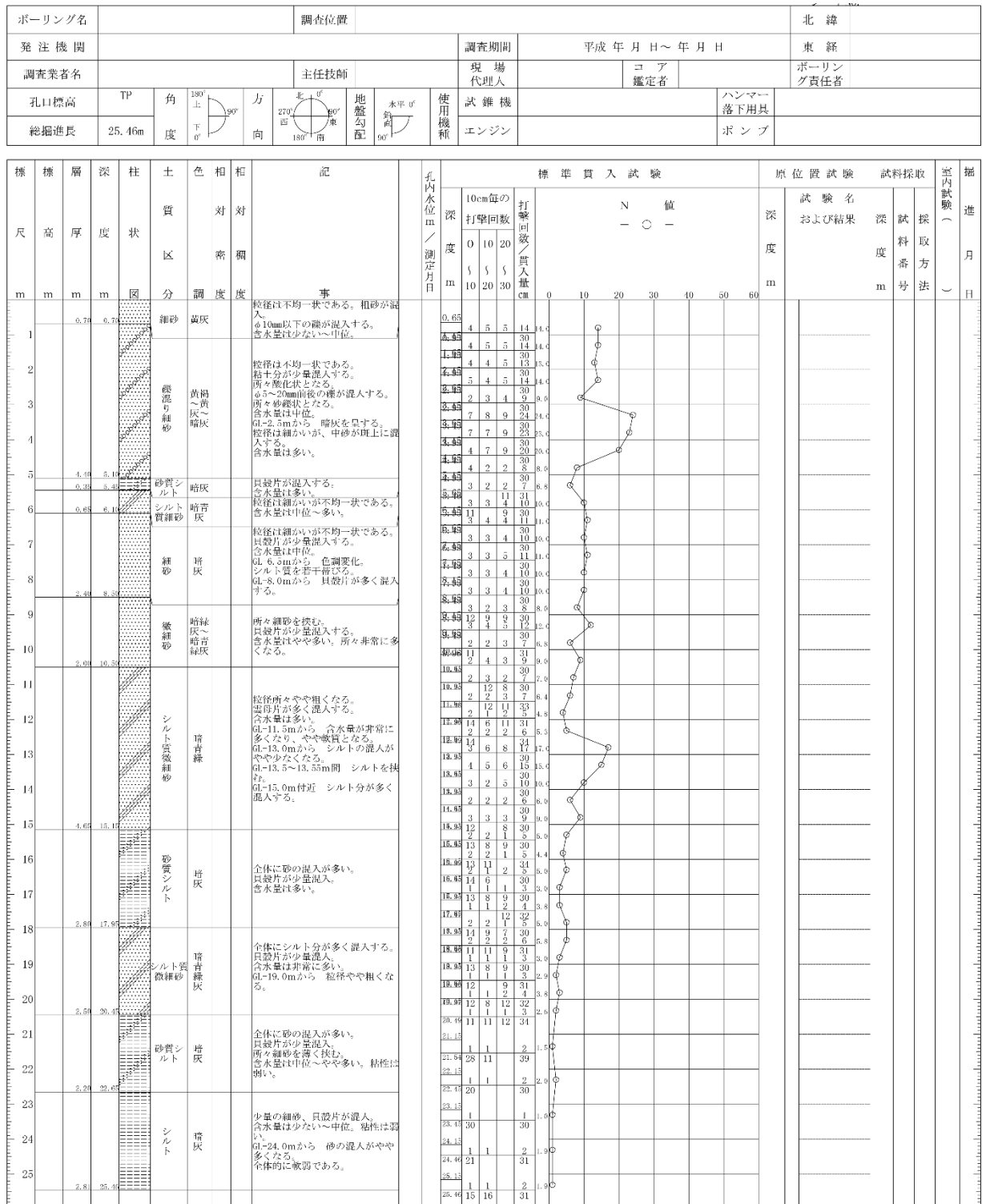


図-A.1 浮島現場実験の SPT の結果

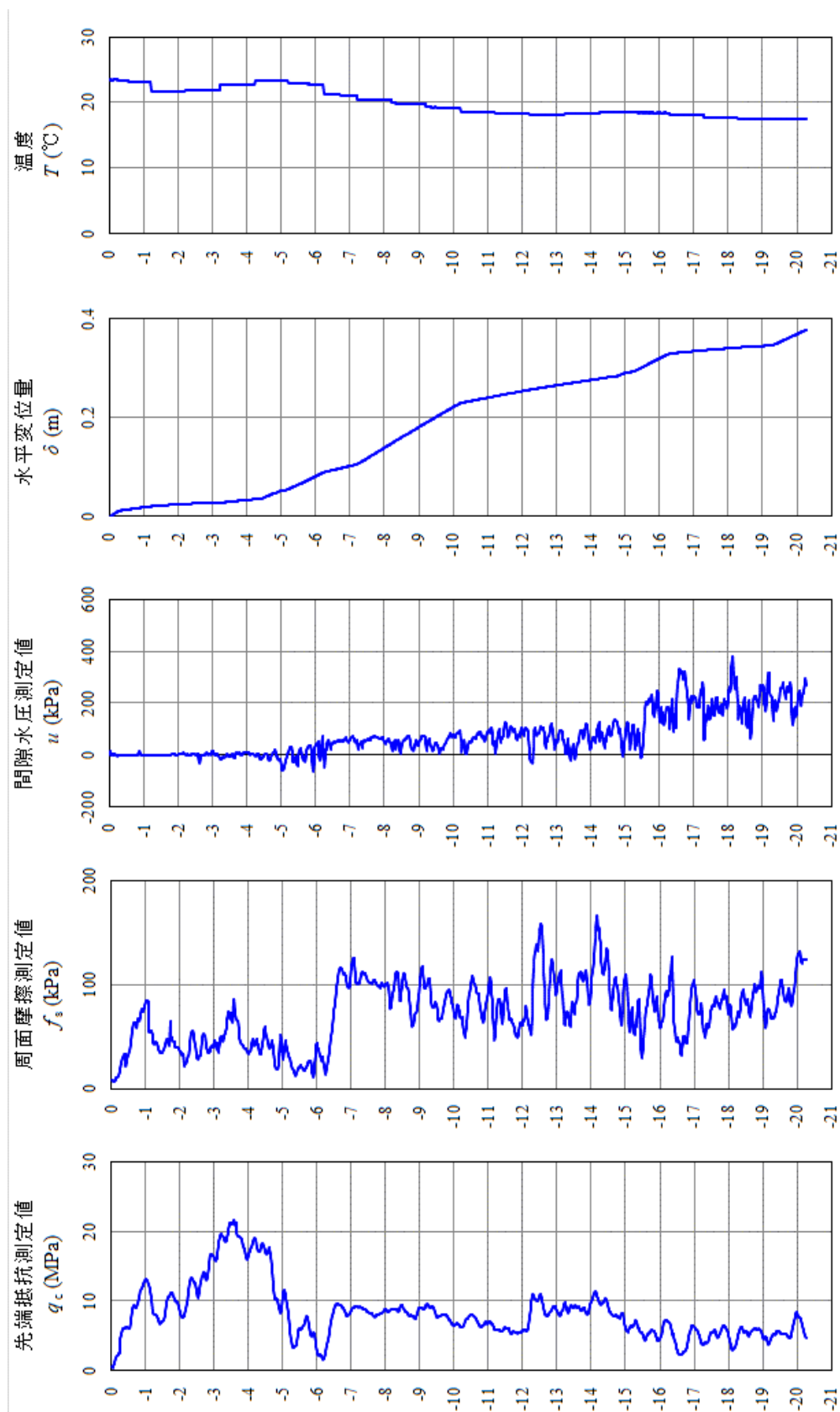


図-A.2 浮島現場実験の CPT の深度分布

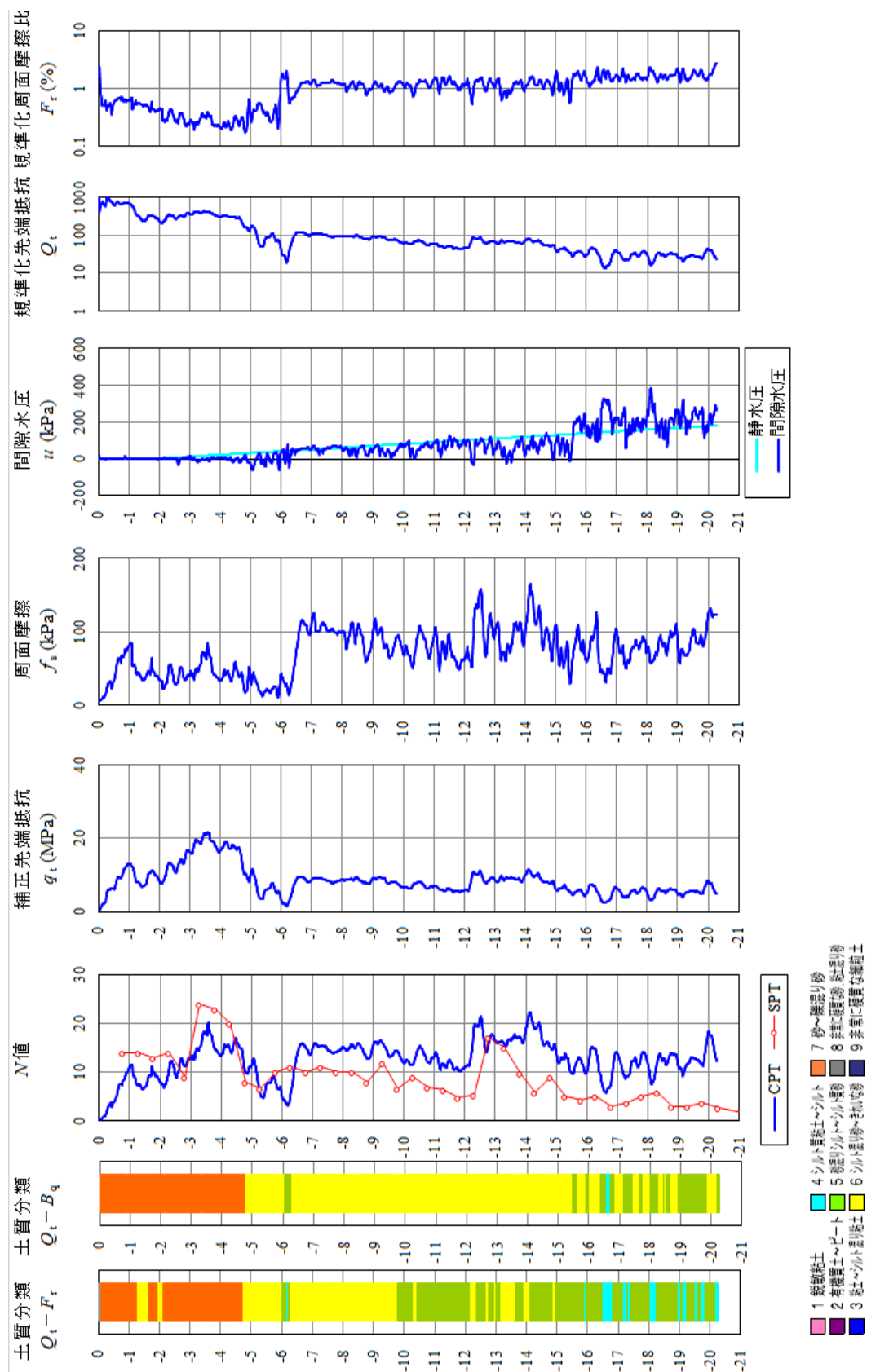


図-A.3 浮島現場実験の CPT の測定結果

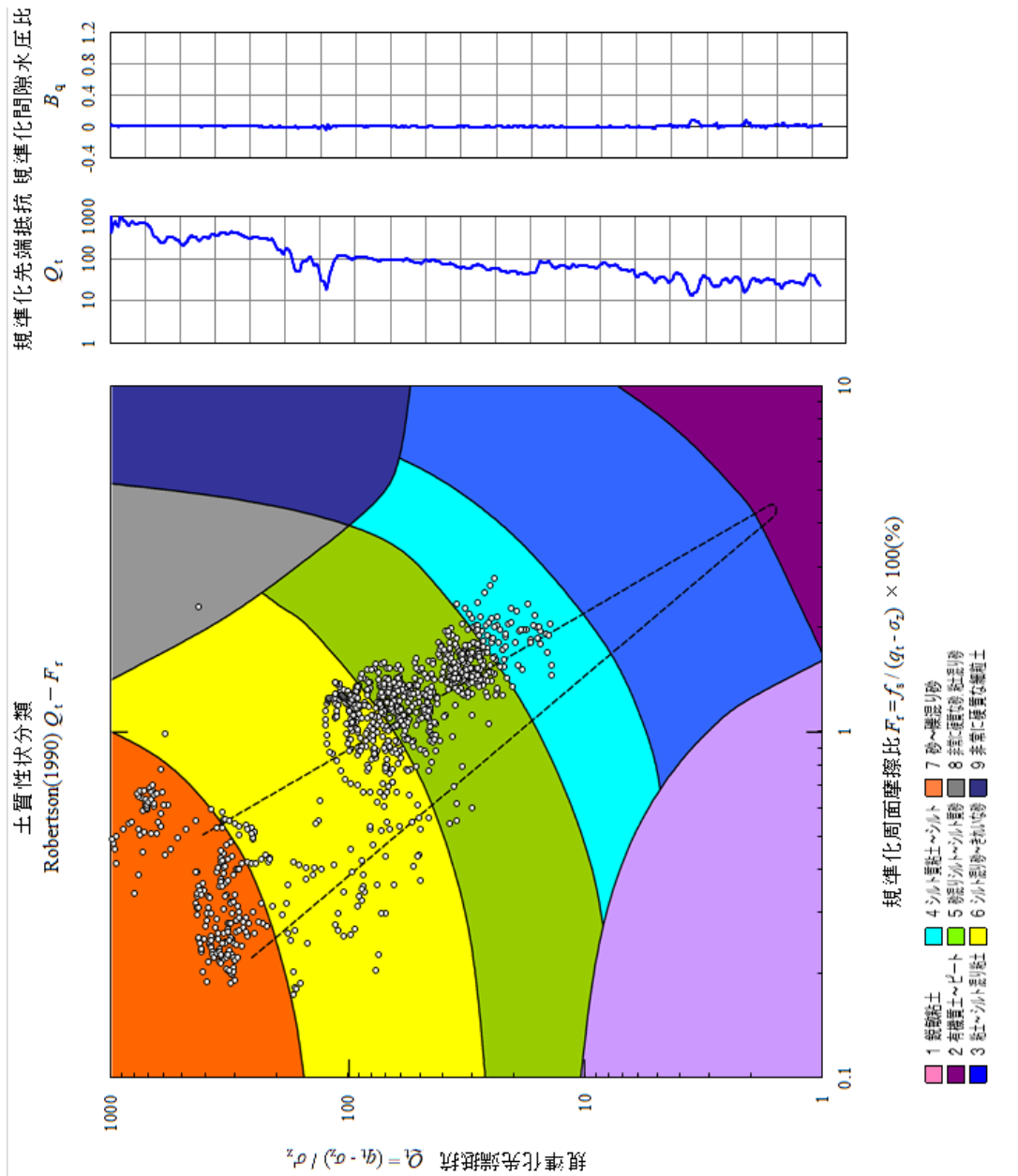


図-A.4 浮島現場実験の CPT による土質分類

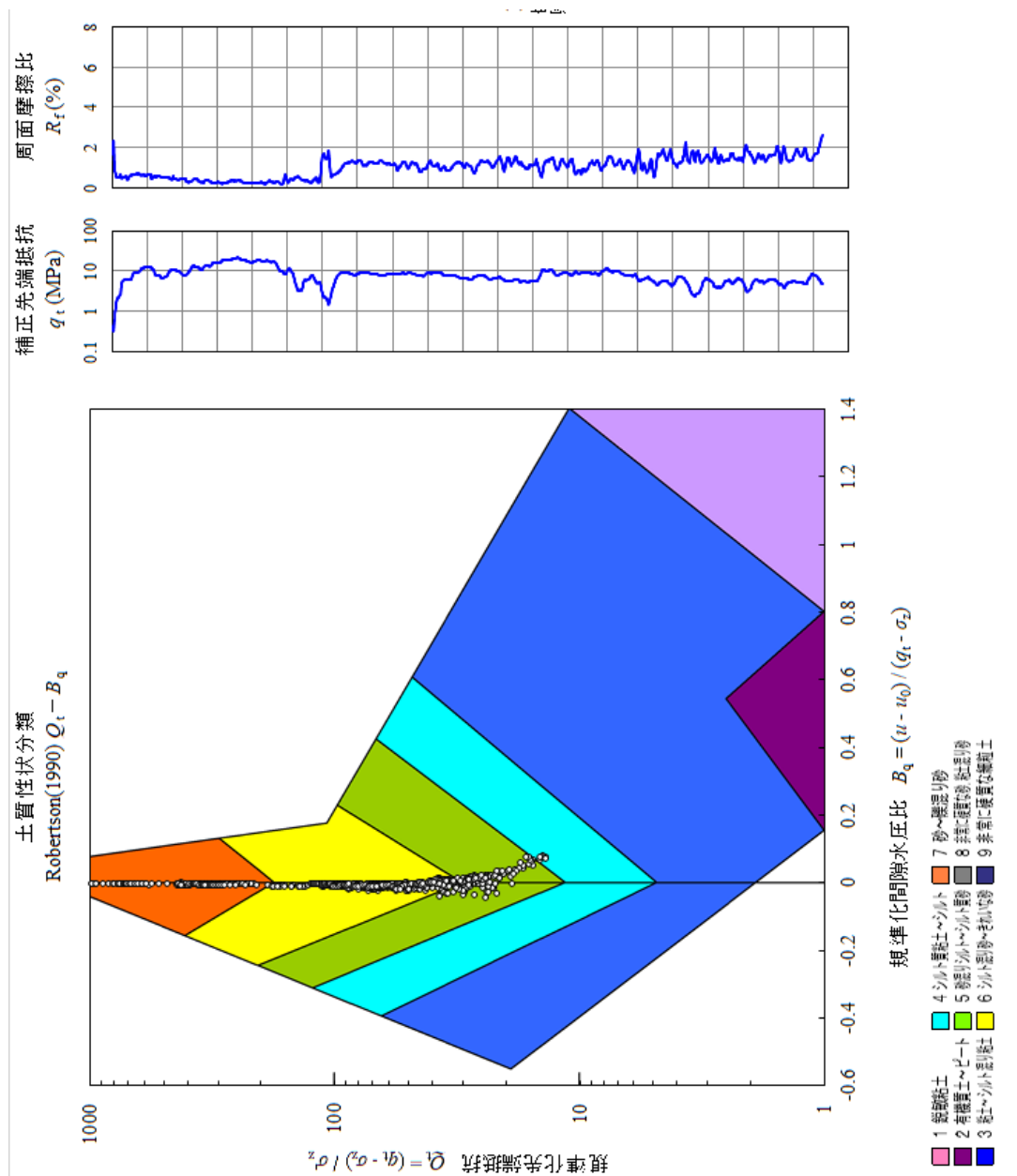


図-A.5 浮島現場実験の CPT による土質分類

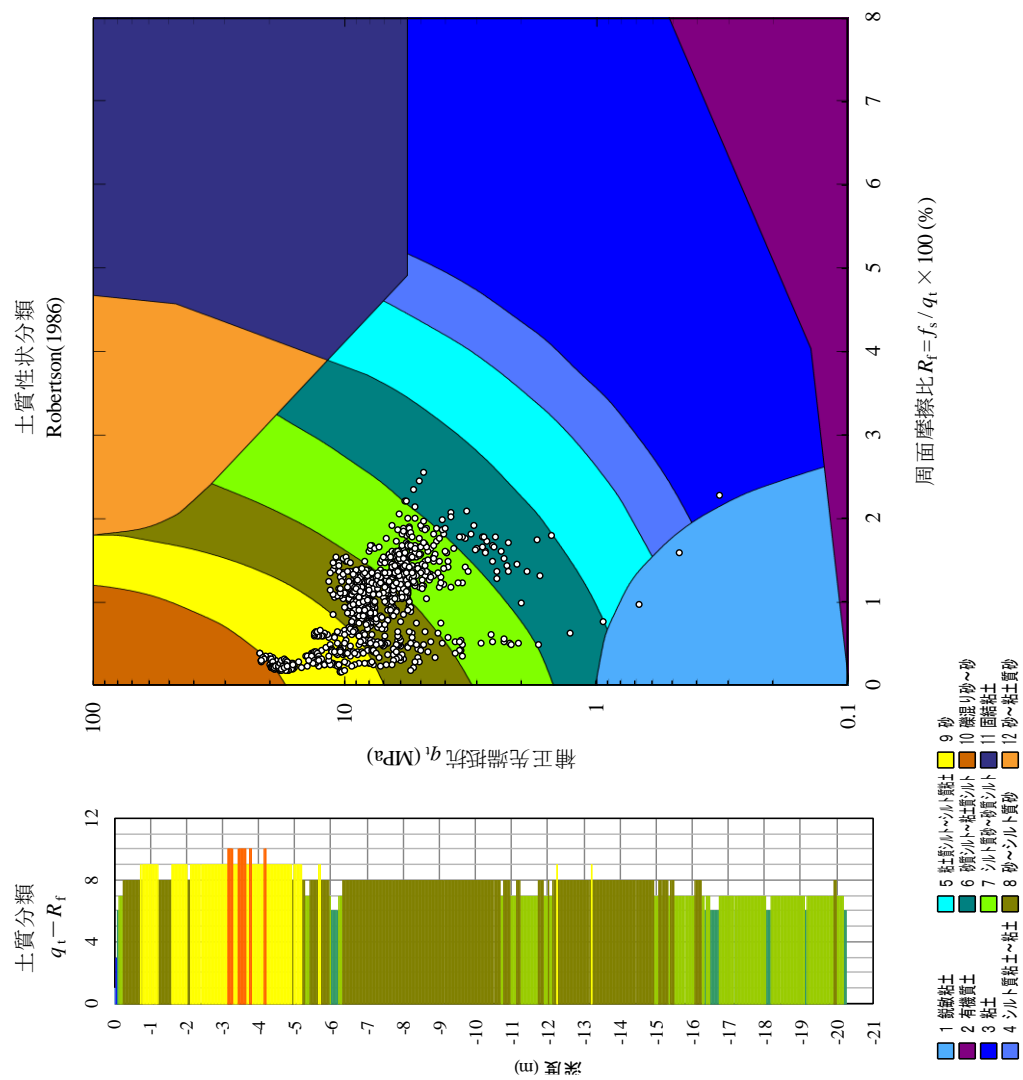


図-A.6 浮島現場実験のCPTによる土質分類

謝辞

研究生生活を送るにあたって、指導教官である谷和夫教授、池谷毅教授からは終始熱心かつ細やかな指導を賜りました。また、研究に関して稲津准教授、岡安教授には多くの助言を賜りました。心から感謝の意を表します。

また、以下の企業から下記の項目に関して協力を賜りました。ここに感謝を表します。

- ・ バイプロハンマの借用 調和工業(株)
- ・ 試験装置の作製 立川機械製作所, (有)アイオーテクニク
- ・ 実験場の提供 地盤試験所(株)

海洋地盤工学研究室の折田君,Choi 君からは実験の補助を受けたり、研究に関する議論をしたりするにとどまらず、互いに教え協力しあうなかで良い刺激を受けることができました。また、沿岸域工学研究室の北村さん、宇野さん、Khan さん、Hieu さん、陳さん、Moe さん、高さん、土橋君、米山君、李さん、小野さん、金君、望月君は、研究生生活を送るなかで互いに支え合い、切磋琢磨し合えた仲間でした。うまくいかないことは多々ありましたが、一つ一つ乗り越えてこれたのはひたすら先生方と研究室の皆さんのおかげです。悩んでいるときには手を差し伸べてくれる家族のような環境であったと思います。本当にありがとうございました。

最後に、筆者が本大学へ進学することを理解し支援してくれた父と母に心から感謝の意を表し、謝辞とさせていただきます。